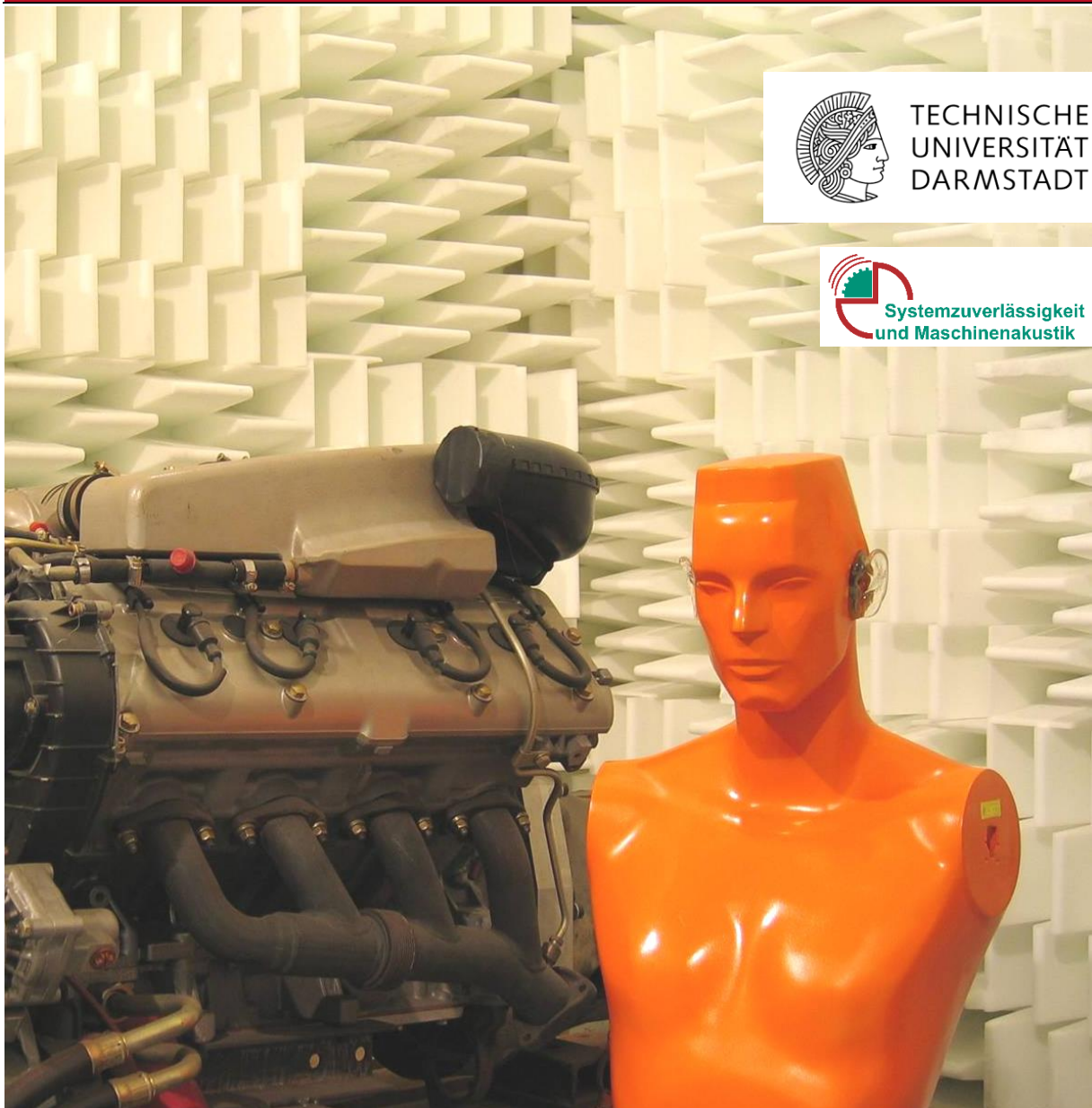


# Dynamische Modellierung eines Zellmoduls für Energiespeichersysteme

Masterarbeit

Luis Acosta Falcón | 2653167

Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Systemzuverlässigkeit  
und Maschinenakustik



Luis Acosta Falcón  
Matrikelnummer: 2653167  
Studiengang: Maschinenbau

Masterarbeit  
Thema: "Dynamische Modellierung eines Zellmoduls für Energiespeichersysteme"

Eingereicht: 11. August 2016

Betreuer (SzM): Alexander Dautfest M.Sc.

Betreuer (BMW Group): Dipl.-Ing. Philip Kotter

Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM  
Fachbereich Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt  
Magdalenenstraße 4  
64289 Darmstadt

---

---

---

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

---

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Sämtliche aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Darmstadt, den 11. August 2016

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
1    Einleitung.....	1
1.1    Problemstellung.....	2
1.2    Zielsetzung .....	2
1.3    Aufbau der Arbeit .....	3
2    Stand der Technik .....	6
2.1    Grundlagen elektrochemischer Energiespeichersysteme .....	6
2.1.1    Lithium-Ionen Zellen.....	6
2.1.2    Zellmodul .....	11
2.1.3    Hochvoltspeicher.....	12
2.2    Materialmodellen der Li-Ion-Zellen.....	13
2.2.1    Grundlagen der Mechanik.....	13
2.2.2    Materialcharakterisierung von Lithium-Ion-Batterien .....	15
2.2.3    Composite rule of mixture.....	16
2.3    Strukturdynamik.....	17
2.3.1    Feder-Masse-Dämpfer-Systeme.....	17
2.3.2    Modalanalyse .....	23
2.3.3    Laser Doppler-Vibrometer .....	24
2.4    Finite Element Methode.....	25
2.4.1    Simulationsmethode der Lithium-Ionen-Zelle in der Fahrzeugsimulation .....	26
2.4.2    Simulationsmethodik zur Abbildung der Li-Ionen-zelle.....	29
2.5    Modell-Updating-Verfahren .....	30
2.5.1    Mode Pairing-Kriterien.....	31
2.5.2    Kalibrierung durch Optimierung.....	32
3    Simulative Modalanalyse .....	35
3.1    Aufbau des FE-Modells der Zell.....	35
3.2    Aufbau der Zellmodulsimulation.....	37
3.3    Simulationsergebnisse.....	39
4    Experimentelle Modalanalyse .....	42
4.1    Versuchsplanung und -durchführung .....	42
4.2    Analyse der experimentell ermittelten Übertragungsfunktion.....	45
4.3    Modenbestimmung .....	46
4.3.1    Auswertung der Modulrahmen.....	47
4.3.2    Auswertung der 8er-Zellmodul.....	50
4.3.3    Auswertung der 16er-Zellmodul.....	53
5    Model-Updating.....	56
5.1    Abgleich den Schwingmoden .....	56
5.2    Sensibilitätsanalyse.....	61
5.3    Optimierung .....	71
6    Zusammenfassung und Ausblick .....	75

---

Literaturverzeichnis.....	i
---------------------------	---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Schematische Berechnungsmethode zur numerischen Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Zellmodulen .....	5
Abbildung 2: Verschiedene Zellbauformen: prismatische Zelle (links), Rundzelle (Mitte) und Pouch-Zelle (links) (Axeon) .....	10
Abbildung 3: Explosionsdarstellung eine prismatische Zelle .....	10
Abbildung 4: Explosionsdarstellung eines Zellmoduls .....	11
Abbildung 5: Explosionsdarstellung eines Zellmoduls (Kampker 2014) .....	12
Abbildung 6: Körper unter Normalspannung (links) und Scherung (rechts) (Zinner 2013)...	15
Abbildung 7: Feder-Masse-Dämpfer-Systeme (D. Giljohann) .....	17
Abbildung 8: Lösung eines freien gedämpften Systems (Zinner 2013) .....	20
Abbildung 9: Amplitude der Übertragungsfunktion ( $v=D$ ) (Zinner 2013).....	22
Abbildung 10: Phase der Übertragungsfunktion ( $v=D$ ) (Zinner 2013).....	22
Abbildung 11: Funktionsprinzip eines Laser-Doppler-Vibrometers (Laderaranch 2008) .....	25
Abbildung 12: Beispiel des FEM-Prozess (Klein 2015) .....	28
Abbildung 13: Beispiel des FEM-Prozess (Thaler und Watzenig 2014).....	29
Abbildung 14: a) Querschnitt der Zellwickel einer Zylindrischen Zelle; b)Detaillierte Darstellung der Schichten; c) FEM-Ersatzelement für den Ausschnitt in b) (Greve und Fehrenbach 2012).....	30
Abbildung 15: Ersatzmodell für den Zellwickel.....	35
Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von einen Druckversuch in Out-of-Plane-Richtung (Lai et al. 2013a) .....	37
Abbildung 17: Modellierung des Aufbaus eines Zellmoduls .....	38
Abbildung 18: Modellierung des Aufbaus eines Zellmoduls .....	39
Abbildung 19: erste Biegeschwingung des Rahmenplattes (links), erste Biegeschwingung des Rahmenblechs.....	40
Abbildung 20: Frequenz Abweichung der lokalen Schwingmoden bei m-Zellmodul.....	40
Abbildung 21: Dritte lokale Biegeschwingung des Rahmenblech (links) erste globale Biegeschwingung (recht) .....	41
Abbildung 22: Prüfaufbau zur Durchführung eines experimentellen, 16er Zellmoduls .....	43

---

Abbildung 23: Prüfaufbau des Modulrahmens .....	44
Abbildung 24: Virtuelles Zellmodul bestehend aus Rahmenplatte, -blech und Zellkontaktiersystem.....	44
Abbildung 25: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 4 kHz des Modulrahmens.....	46
Abbildung 26: Virtueller Modulrahmen bestehend aus Rahmenblech und Rahmenplatte .....	47
Abbildung 27: a) und b) 1er und 2er Biegeschwingung des Rahmenblechs, c) 1er Biegeschwingung der Rahmenplatte, d) Torsionsschwingung des Prüflings.....	49
Abbildung 28: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1500 Hz von der 8er-Zellmodul .....	50
Abbildung 29: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4000 Hz von der 8er-Zellmodul .....	51
Abbildung 30: MAC – Vergleich Modulrahmen .....	52
Abbildung 31: a) Torsionsmode des 8er-Zellmoduls, b) 1er Biegeschwingung des 8er-Zellmoduls.....	53
Abbildung 32: Virtueller 16er-Modul bestehend aus Rahmenblechs, Rahmenplatten und Zellkontaktiersystem.....	53
Abbildung 33: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1500 Hz von der 16er-Zellmodul .....	54
Abbildung 34: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4000 Hz von der 16er-Zellmodul .....	54
Abbildung 35: Erste und zweite Biegemode des 18er-Zellmodul.....	55
Abbildung 36: Verwendetes Koordinatensystem .....	58
Abbildung 37: Numerische und experimentelle Schwingformen des 8er-Zellmodul (1-Biegemode 1. Ordnung, 2-Torsionsmode 1 Ordnung) .....	59
Abbildung 38: Numerische und experimentelle Schwingformen des Modulrahmens .....	60
Abbildung 39: Numerische und experimentelle Schwingformen des 16er-Zellmodul (1-Biegemode 1. Ordnung, 2-Biegemode 2. Ordnung) .....	61
Abbildung 40: Korrelationsmatrix zwischen Parametern und Ergebnissen des numerischen Modells (Rahmen) .....	62
Abbildung 41: Antwortoberflächen von verschiedenen modalen Parameter .....	63

---

Abbildung 42: Korrelationsmatrix zwischen den Parametern und den Ergebnissen des numerischen Modells (8er und 16er Modul) .....	64
Abbildung 43: Einfluss des Elastizitätsmoduls des AM in Out-of-plane-Richtung über verschiedene modale Parameter.....	65
Abbildung 44: : Spearman Korrelationsmatrix zwischen dem Elastizitätsmodul der Klebefolie und den modalen Parameter (8er und 16er Modul) .....	66
Abbildung 45: Einfluss des Elastizitätsmoduls der Klebefolie auf verschiedene modale.....	67
Abbildung 46: Abgleich der Frequenzabweichungen der drei Modelle .....	68
Abbildung 47: Spearman Korrelationsmatrix zwischen Designvariablen und die modalen Parameter (8er und 16er Modul) .....	69
Abbildung 48: Einfluss des Elastizitätsmoduls der Klebefolie auf verschiedene modale.....	70
Abbildung 49: Verhältnis zwischen den Frequenzabweichungen und den am korrelierten Designvariablen .....	70
Abbildung 50: Flussdiagramm der entwickelten Kalibrierungsmethode .....	71
Abbildung 51: Ablauf der Optimierungsprozess .....	72
Abbildung 52: Abweichung zwischen initialen und finalen modalen Parameter des Modulrahmens.....	73
Abbildung 53: Abweichung zwischen initialen und finalen modalen Parametern des 8er- und 16er- Modul.....	73



---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1: 4 ersten Biegemoden des 8er- und 16er-Zellmodul.....	42
Tabelle 2: Während der Messungen verwendeten Parameter .....	45
Tabelle 3: Modalen Parameter Modulrahmen.....	48
Tabelle 4: Modalparameter 8er-Zellmodul.....	51
Tabelle 5: Modalparameter 8er-Zellmodul.....	55
Tabelle 6: Abgleich Messungen mit numerische Ausgangdaten.....	59
Tabelle 7: Abgleich modalen Parameter mit und ohne Zellwickelt .....	65
Tabelle 8: Abgleich modalen Parameter mit hohe und niedrige Steifigkeit der Kleberfolie ....	68

---

## 1 Einleitung

---

Der Umweltschutz und der Klimawandel liegen heutzutage für die gesamte Industrie im Vordergrund (Hanselka und Jöckel 2010). Die Umweltsituation in den letzten Jahren fordert eine Beschleunigung in der Entwicklung von neuen Energie- und Transporttechniken (Schwedes 2011). Automobilhersteller entwickeln neue Wachstumsstrategien, bei denen die Entwicklung von Elektro- und Hybridfahrzeuge eine hohe Priorität haben (Schuler 2011).

Die Geschichte der Elektromobilität reicht mehr als hundert Jahre zurück. Fünf Jahre vor der Präsentation des Patentmotorwagens von Karl Benz stellte Gustave Trouvé in der „Exposition Internationale d'Électricité“ seine Erfindung vor: das erste Elektrofahrzeug. Andere Hersteller folgten Trouvé und bauten eigene Elektrofahrzeuge auf. Nachteile von diesen ersten Elektrofahrzeuge waren die gleiche als Heute: kurze Reichweite, lange Ladezeiten und teure Batterien. (Kampker 2014)

Im Jahr 2007 wurde das neue Energie- und Klimaprogramm, das den Herstellern eine starke Senkung der Abgasemission auferlegt, von der deutschen Regierung übernommen. Vor allem wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen und Feinpartikelbelastung geregelt. Erster Schritt war die Einrichtung von Umweltzonen in Städten. Ebenso mussten die Unternehmen ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen unter einer bestimmten Grenze halten. (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. 2007)

Aufgrund der neuen Umweltsensibilisierung kamen Hybrid- und Elektrofahrzeuge in den Vordergrund. Vor allem in großen Städten, wo Abgasemission dadurch verringert werden können. Außerdem haben Elektrofahrzeuge eine bessere Effizienz im Stop-and-Go-Verkehr, da sie Bremsenergie rückgewinnen können. Wegen der niedrigen Forschung im letzten Jahrhundert, werden heute im Bereich der Elektromobilität viele neue Herausforderungen vorgestellt. Viele von denen fokussieren sich an der Entwicklung von leistungsfähigen Energiespeichersysteme. (Kampker 2014)

- Hohe Leistungs- & Energiedichte
- Geringer Anteil Peripherie und Strukturbauteile

- 
- Leichtbau
  - Genaue Kenntnis des mech. Verhalten.

---

## 1.1 Problemstellung

---

Der Hochvoltpeicher ist die Schlüsseltechnologie der elektrifizierten Antriebe. Seine Kernkomponenten sind die Batteriezellen, welche in Modulen angeordnet sind. Das mechanische Verhalten der Zellmodule beeinflusst das mechanische Verhalten des Systems signifikant und hängt grundsätzlich von der Geometrie und Materialeigenschaften deren Subkomponenten ab.

Bei der Entwicklung von Batteriezellen konzentrieren sich die Hersteller primär auf die Untersuchung und Verbesserung der elektrischen und thermischen Eigenschaften. Da die OEM-Kunden bislang keine spezifischen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Aktivmaterials stellen, werden mechanische Materialdaten meist vernachlässigt (Korthauer 2013) . Aus diesem Grund gibt es zurzeit keine durchgängigen Methoden, die eine Charakterisierung des Steifigkeits- und Schwingverhaltens von Zellverbünden betrachten (siehe Abschnitt 2.2.2).

In der Design- bzw. Entwicklungsphase neuer Produkte oder Prozesse spielt die FE-Methode eine wichtige Rolle. Sie ermöglicht die Überprüfung neuer Konzepte ohne Hardware-Versuche, wodurch Zeit und Kosten gespart werden. Um eine effiziente Berechnungszeit zu erlangen, ist bei den Modellen auf eine ausreichende Vereinfachung und Reduzierung zu achten. Hierdurch werden Abweichungen zwischen Modell und dem Realverhalten des Systems verursacht, die es zu minimieren gilt.

---

## 1.2 Zielsetzung

---

Das Hauptziel der Arbeit ist es eine

- physikalisch basierte,
- transferierbare,
- validierte Berechnungsmethode

---

zur numerischen Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Zellmodulen zu entwickeln. Dazu wird ein lineares FE-Modell aufgebaut. Um eine hohe Genauigkeit und Effizienz zu gewährleisten, werden geeignete Materialmodelle, Geometrie, Rand- und Kontaktbedingungen ermittelt.

Bestehende wissenschaftliche Arbeiten untersuchen das dynamische Verhalten von Zellverbünden nicht in ausreichendem Detailgrad, sodass ein Abgleich zu simulativen Ergebnissen bislang nicht durchgeführt werden kann. Zur Erreichung des Primärziels sind die Planung und Durchführung von experimentellen Untersuchungen unverzichtbar, mit denen das FE-Modell validiert wird. Die Versuche erfordern die Erstellung von Versuchsplänen und die Auswertung der ermittelten Ergebnisse. Anschließend werden Besonderheiten und Tendenzen identifiziert und diskutiert.

Um die experimentellen Ergebnisse mit dem Modell zu vergleichen, wird ein Abgleichverfahren entwickelt. Im Rahmen des verwendeten Optimierungsvorgehens wird die Sensitivität des Ergebnisses auf verschiedene Eingangsparameters identifiziert. Um die Abweichung zwischen Simulation und Experimenten zu verringern, werden die ermittelten Parameter entsprechend optimiert. Das letzte Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines Kalibrierungsverfahrens, das die eben genannten Anforderungen erfüllt.

Schließlich werden Grenzen der Gültigkeit der entwickelten Modellierungs- und Fitting-Methode zusammengefasst.

---

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

---

Das anschließende Kapitel gibt dem Leser einen grundlegenden Überblick der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Themen. Am Anfang wird das untersuchte System und dessen Komponenten beschrieben. Anschließend werden die existierenden Materialmodelle der Li-Ion Zellen zusammengefasst. Eine kurze Einführung in Strukturdynamik und in die experimentelle Ermittlung von Modalparametern wird ebenfalls gegeben. Schließlich werden die FE-Methode und Modell-Updating-Verfahren erläutert.

---

Kapitel 3 bis 5 umfassen den Kern der Arbeit und beschreiben die notwendigen Schritte, die für die Modellbildung dieser Arbeit notwendig sind. In Abbildung 1 ist das generische Vorgehen schematisch dargestellt. Jede farbige Markierung kennzeichnet die Zugehörigkeit zu den einzelnen Kapiteln.

Kapitel 3 (gelb) beschreibt den Aufbau des FE-Modells. Hier werden die verwendeten Materialmodelle, der Aufbau des Mesh, die Rand- und Kontaktbedingungen erläutert. Die vom simulativen Modell ermittelten modalen Parameter sowie Besonderheiten werden in diesem Kapitel aufgezeigt und diskutiert.

Kapitel 4 (rot) beschäftigt sich mit dem experimentellen Gegenstück. Die verschiedenen Versuchskonfigurationen und Prüflinge werden zuerst erklärt. Anschließend werden die ermittelten Schwingformen analysiert und kategorisiert.

In Kapitel 5 (blau) wird der Abgleich zwischen numerischen und experimentellen modalen Parametern erläutert und durchgeführt. Ebenso werden in diesem Kapitel mit einer Sensitivitätsanalyse die Parameter ermittelt, die das Ergebnis signifikant beeinflussen. Diese werden im anschließenden Optimierungsprozess angepasst, bis eine zufriedenstellende Konvergenz erreicht ist.

Schließlich gibt Kapitel 6 eine Zusammenfassung und Ausblick der gesamten Arbeit.

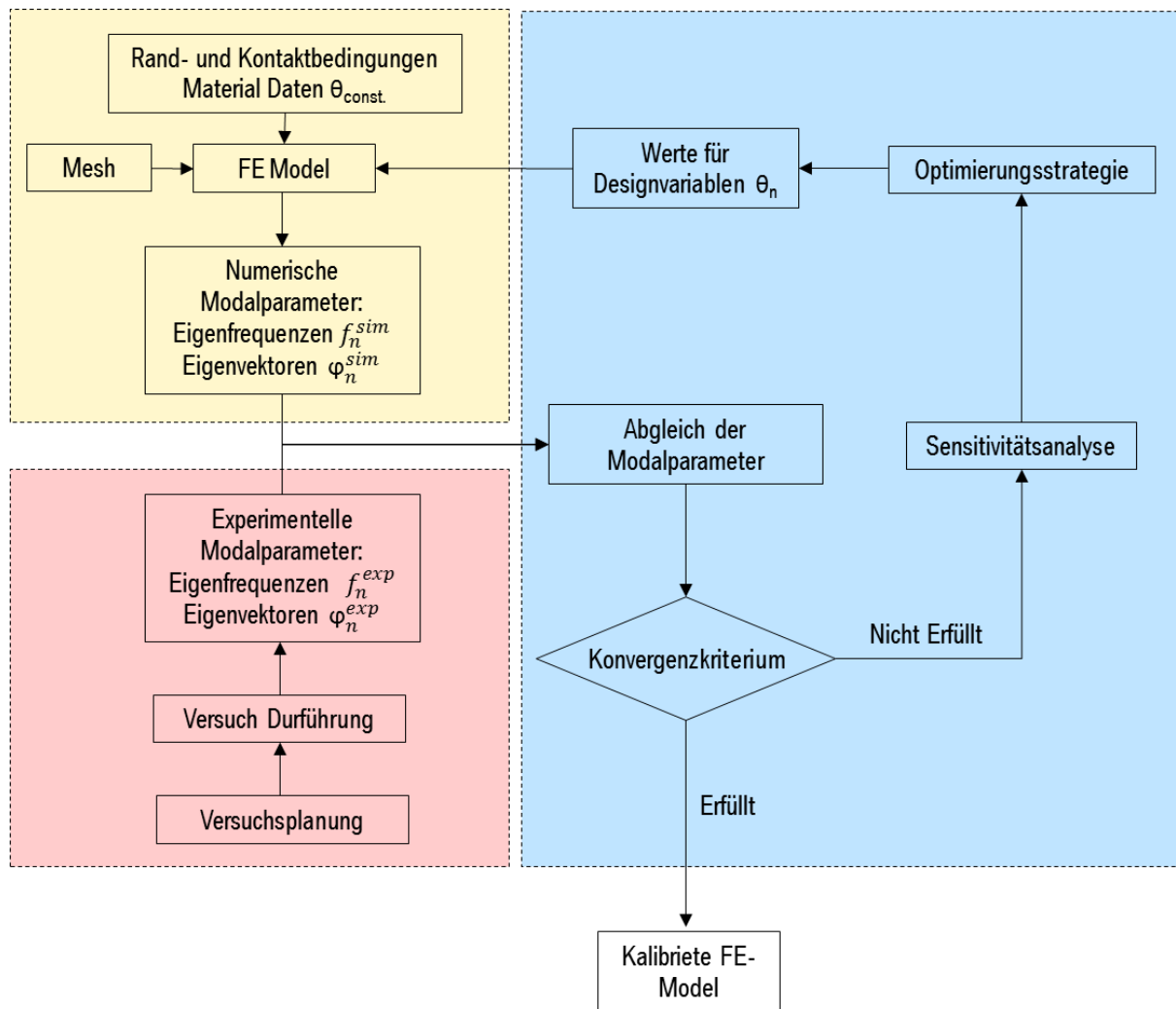


Abbildung 1: Schematische Berechnungsmethode zur numerischen Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Zellmodulen

---

## 2 Stand der Technik

---

In diesem Kapitel werden alle theoretischen Grundlagen vorgestellt, die später in Rahmen dieser Arbeit verwenden werden. Zuerst wird eine kurze Einführung in dem Aufbau eines Hochvoltspeichers gegeben. Anschließend werden Materialmodelle, Strukturdynamik, Finite-Elemente-Methoden (FEM) und Updating-Verfahren behandelt.

---

### 2.1 Grundlagen elektrochemischer Energiespeichersysteme

---

Bei Elektro- und Hybridfahrzeuge wird der Elektromotor durch den Hochvoltspeicher mit elektrischer Energie versorgt. Meist sind Batterien ein Verbund aus zusammengeschalteten Zellen, die in Modulen eingeordnet sein können. Die Zellen bestehen aus Elektrolyt, Separator, Gehäuse und einem Elektrodenpaar, in dem die chemische Energie gespeichert wird. Diese Energie wird durch die Reduktion des Aktivmaterials in der Katode und die Oxidation des Aktivmaterials in der Anode in elektrischen Energie umgewandelt. Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau und Funktionsweise der Komponenten im Hochvoltspeicher erläutert.

---

#### 2.1.1 Lithium-Ionen Zellen

---

Lithium-Ion-Batterien sind sekundäre bzw. wiederaufladbare Batterien. Das bedeutet, dass ihre Ladung und Entladung reversibel ist und jedoch minimale physikalische Veränderungen verursacht, die sich auf die Lebensdauer auswirken. Die Lithium-Ion Batterien weisen die folgenden Vorteile im Vergleich zu anderen Batterien auf (Yoshio 2009):

- Hohe spezifische Energie (150 Wh/kg)
- Hohe Energiedichte (400 Wh/l)
- Niedrige Selbstentladungsrate (2 bis 8% pro Monat)
- Lange Lebensdauer (mehr als 1000 Zyklen)
- Breites Betriebstemperaturberiech (-40 bis 65°C)

---

Nachteile von Lithium-Ion-Zellen sind die Verschlechterung durch Entladungszustände unter 2 V sowie der Kapazitätsverlust bei niedrigen Temperaturen. Ebenfalls müssen sie abgeführt werden, wenn sie überladen sind. (Yoshio 2009)

Lithium-Ion-Batterien verwenden mechanische und elektrische Vorrichtungen, um gegen Tiefentladung, Überladung und Hochtemperaturbedingungen geschützt zu sein. Die Kombination dieser Eigenschaften und die wettbewerbsfähigen Kosten ermöglicht die Verwendung dieser Technologie in vielen Bereichen. (Yoshio 2009)

Elektroden sind die Materialien, die die Einlagerung von Lithium-Atomen ermöglichen. Darüber hinaus sollten geeignete Materialien für positive Elektroden ein hohes chemisches Potenzial haben und für negative ein niedriges. Elektroden müssen unter einem Potenzialbereich bleiben, in dem keine unerwünschten Reaktionen des Elektrolyten stattfinden. Ebenso sollen sie noch andere Anforderungen erfüllen, wie z.B. niedrige Dichte, unschädlich für die Umwelt, Verfügbarkeit und wirtschaftlich erschwinglich. (Yoshio 2009)

Die positive Elektrode bzw. die Kathode besteht weitgehend aus einem 15  $\mu\text{m}$  Aluminium-Stromkollektor, der mit einem Lithium-Metalloxid beschichtet ist. Während der Ladungsphase bewegen Lithium-Ionen in die Anode. Vorteilhaftes Eigenschaften für positive Elektroden sind: (Besenhard 1999)

- Hohe freie Reaktionsenergie mit Lithium, um hohe Zellspannungen und hohe Energiedichten zu erreichen
- Hohe Energiekapazität
- Erfahren keine strukturellen Veränderungen, während Ladung und Entladung
- Hohe elektrische Leitfähigkeit und Ionenmobilität
- Unlöslich im Elektrolyten

$\text{LiCoO}_2$  (NCA) und  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (NMC) sind die am meisten verwendeten Werkstoffe.  $\text{LiCoO}_2$  bietet eine höhere Kapazität, eine hohe Spannung und eine längere Zyklus-Lebensdauer.



---

Andererseits sind  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  billiger und bietet eine außergewöhnliche Stabilität, eine höhere Spannung einen Mangel an Toxizität. Allerdings weisen die niedrigere Kapazitäten und eine höhere Kapazitätsverlust bei erhöhten Temperaturen. (Besenhard 1999)

Die positive Elektrode bzw. die Anode besteht normalerweise aus einem  $\sim 10 \mu\text{m}$  Kupferfolie beschichtet mit einer Mischung aus hoch rütteldichte, künstliches Graphit und nicht-flurierte Bindermittel. Ein geeigneter Kohlenstoff für die Anode der Lithium-Ion-Batterien sollte die folgenden Eigenschaften aufweisen: (Besenhard 1999)

- Kostengünstig,
- Leicht manipulierbar
- Hohe Kapazität in elektrochemische Arbeitsbereiche von 0 bis 0.5 V

Graphit hat ideale Eigenschaften für negative Elektrode, da der hohe Kapazität, niedrige Dichte und eine relative niedrige Preise aufweist (Ritchie und Howard 2006; Birke und Schiemann 2013). Die Qualität und Anzahl des Hohlraumes, auf den die Graphit Lithium-Ionen sich absetzen, hängen von der Struktur und Mikromorphologie des Kohlenstoffs.

Kupferfolien sind zurzeit die einzigen verwendeten Werkstoffe in negativen Elektroden, da die stabil im Potentialbereich der Elektrode sind und die nicht mit Lithium oder Elektrolyte Komponenten reagieren. (Cousseau et al. 2006; Jossen und Weydanz 2006)

Der Elektrolyt ist eine leitende Flüssigkeit, die die Beweglichkeit der Ionen zwischen den beiden Elektroden ermöglicht. Die grundlegenden Anforderungen eines geeigneten Elektrolyten sind: (Wakihara und Yamamoto 2008)

- Niedrige Schmelz- und hohe Verdampfungstemperatur
- Stabilität und Ungiftigkeit
- Hohe ionische Leitfähigkeit in einem Temperaturbereich von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $80^\circ\text{C}$

- 
- Chemische und elektrochemische Kompatibilität mit Elektroden und inaktive Materialien
  - Selektive Solvatierungseigenschaften

Die Elektrolyte bestehen aus einem Lithium-Salz Lösung, die mit einen oder mehreren organische Lösungsmittel und Zusätze gemischt ist. Weitgehend werden in Lithium-Ion-Batterien flüssige Elektrolyte verwendet, die sowohl die Elektrode als auch die Separator aufnehmen können. (Wakihara und Yamamoto 2008)

Lithium-Hexafluoride ( $\text{LiPF}_6$ ) ist das am meisten verwendete Salz, da es eine hohe Ionenleitfähigkeit und geeignete Sicherheitseigenschaften bietet. Allerdings ist es teuer und erzeugt Fluorwasserstoffsäure, wenn es mit Wasser reagiert. Die Ionenleitfähigkeit ist von großem Interesse. Die beeinflussen den Widerstand und den Wirkungsgrad der Batterie. Obwohl viele Lösungsmittel starke ionische Leitfähigkeiten ausweisen, wenn die mit einem geeigneten gelösten Stoff gemischt sind, sind nur einige von denen stabil. Aufgrund dessen entscheidet die Industrie stabile Lösungsmittel zu benutzen, wie z.B. die Karbonate. (Wakihara und Yamamoto 2008)

Weitere positive Eigenschaften von Karbonat-Lösungsmittel sind, dass die eine hohe Konzentration von lihiierter Salze auflösen, gute Sicherheitseigenschaften ausweisen und mit den Elektroden kompatibel sind. Zurzeit verwendet Lithium-Ion-Batterien drei bis fünf Lösungsmittel, um bessere Zelle Leistungen, höhere Leitfähigkeit und einen breiteren Arbeitstemperaturbereich zu erreichen. (Wakihara und Yamamoto 2008)

Die Zellgeometrie lässt sich in drei Zelltypen unterteilen, die in Abbildung 2 gezeigt werden: zylindrische Zelle, prismatische Zelle und Pouch-Zelle.

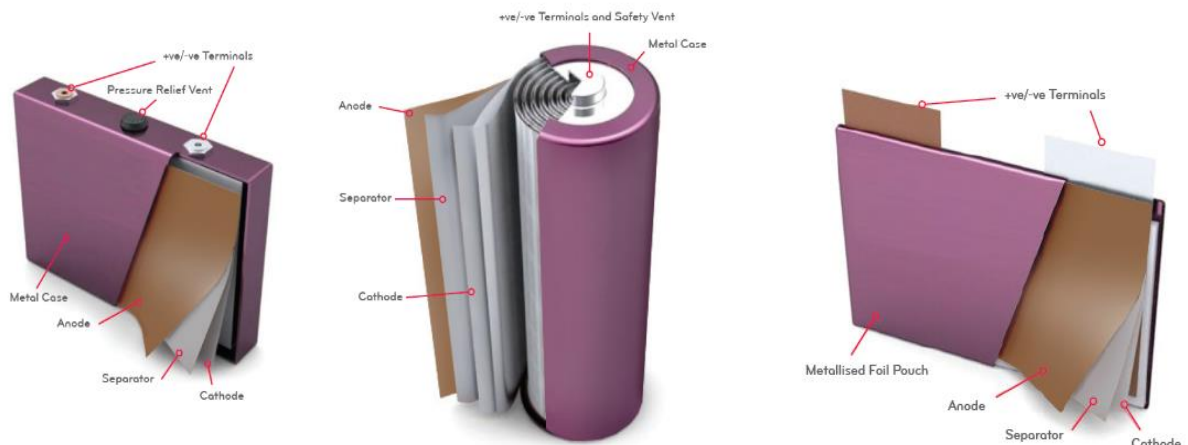


Abbildung 2: Verschiedene Zellbauformen: prismatische Zelle (links), Rundzelle (Mitte) und Pouch-Zelle (links) (Axeon)

In prismatischen Zellen werden die Aktivmaterialien in flachen Schichten zusammengesetzt und in Wickel eingerollt. Jede Elektrode hat eine Lasche, die gebündelt und mit den jeweiligen Ableiterspangen verschweißt werden. Die sind durch eine Bauteil, die als Rivet bezeichnet wird, mit den Terminal verbunden. Bei der Anode findet am Übergang vom negativen Rivet auf das negative Terminal ein Materialwechsel von Kupfer auf Aluminium statt. Während die Anode gegen das Zellgehäuse durch eine Kunststoffplatte isoliert ist, ist die Kathode mit dem Zellgehäuse elektrisch leitend verbunden. Abbildung 3 zeigt eine Explosionsdarstellung eine prismatische Zelle. (Cousseau et al. 2006; Reddy und Linden 2011)

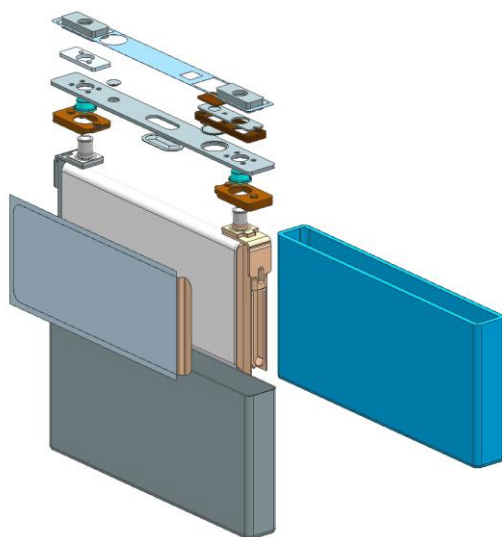


Abbildung 3: Explosionsdarstellung eine prismatische Zelle

---

### 2.1.2 Zellmodul

---

Das Zellmodul ist eine Komponente des Hochvoltspeichers (HVS). Es besteht aus einer Anzahl von miteinander verschalteten Zellen. Wenn eine hohe Gesamtspannung gefordert wird, werden die Zellen in Serie geschaltet. Um höhere Batterieleistung zu erzielen, ist eine Parallelschaltung der Zellen notwendig. Die Parallelschaltung hat gegen Reihenschaltung den Vorteil, dass der Ausfall einer Zelle nicht zum Ausfall des gesamten Zellmoduls führt. Um die geeignete Spannung und Leistung zu erreichen, kommt meist eine Kombination der beiden Verschaltungsarten zum Einsatz. (Kampker 2014)

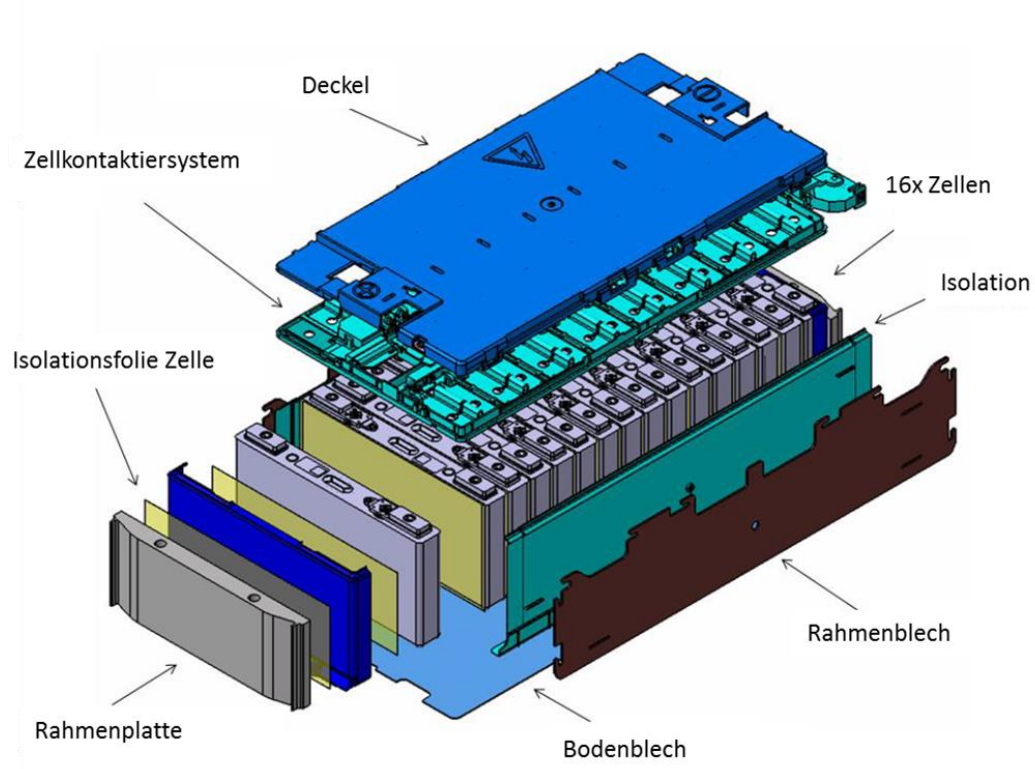


Abbildung 4: Explosionsdarstellung eines Zellmoduls

In Abbildung 4 wurde ein Zellmodul eines HVS dargestellt. Die aneinander gereiht angeordneten Zellen sind durch eine Folie gegeneinander elektrisch isoliert und formen ein Zellpaket aus. Die Randflächen des Zellpakets wurden durch Isolationsfolien gegen Rahmen elektrisch isoliert. Die Befestigung des Zellmoduls an der vorgesehen Tragstruktur wurde durch den Rahmen erfüllt. In ihm befinden sich zwei Bohrungen, die einen Eingriff von Verbindungselementen ermöglichen. Die Zellen sind durch die Zellkontaktiersystem miteinander verschaltet.

---

### 2.1.3 Hochvoltspeicher

---

Schließlich werden die Zellmodule und die peripheren elektronischen Komponenten zusammen aufgebaut, um die Hochvoltspeicher zu fertigen. Die Leistungs- und Reichweitenanforderungen des Fahrzeugs legen die notwendige Anzahl der Zellen fest. Außerdem werden auch der Batteriemanagementsystem, der Kühlsystem, der Thermo-Management und die Leistungselektronik zu den Zellmodulen verbunden. Der Hochvoltspeicher lässt sich im Wesentlichen in drei Baugruppen unterteilen:

- Batteriezellen
- Gehäuse
- Batteriemanagementsystem

Das Gehäuse erfüllt grundsätzlich die Schutz- und Kühlfunktionen, wodurch das optimale Leistungsabgabe und Lebensdauer gewährleistet. Um der Ladezustand der Zellen zu überwachen, ist eine Batteriemanagementsystem notwendig. Zusätzlich bietet es auch die Verbindung zwischen anderen Komponenten des Fahrzeugs und der Batterie und integriert sie im gesamten elektrischen/elektronischen System des Fahrzeugs. Eine schematische Darstellung eines Hochvoltspeichers würde in Abbildung 5 gezeigt. (Kampker 2014)

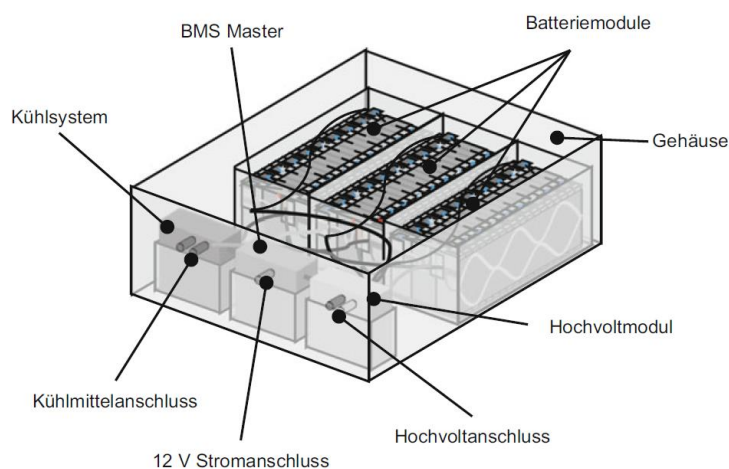


Abbildung 5: Explosionsdarstellung eines Zellmoduls (Kampker 2014)

---

## 2.2 Materialmodellen der Li-Ion-Zellen

---

Die komplexe Materialstruktur des Zellwickels fordert die Entwicklung von Materialmodellen, die die mechanischen Eigenschaften der Li-Ion-Zellen abbilden. Zusätzlich ist die Durchführung von experimentellen Versuche mit Zellen aus Sicherheitsgründen aufwändig. In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen für die Ausarbeitung eines Materialmodells für Li-Ion-Zellen vorgestellt.

---

### 2.2.1 Grundlagen der Mechanik

---

In Rahmen dieser Arbeit werden Materialmodelle beschrieben, um laminare-Verbundwerkstoffe als homogenisierte Materiale zu modellieren. Simulationen werden später mit diesen Modellen durch die FEM-Software ANSYS durchgeführt. In der Literatur werden oft verschiedene Nomenklaturen verwenden, um mechanische Eigenschaften des Werkstoffes zu beschreiben. In dieser Arbeit wird die ANSYS-notation angenommen (ANSYS 2013).

Die grundlegenden mechanischen Parameter werden mit Hilfe des einfachsten mechanischen Materialmodells erläutert: die isotropen linearen elastischen Körper. Um das isotrope Werkstoffmodell zu beschreiben, wird ein zwei-dimensionale Fall verwendet. In Abbildung 6 wird ein Körper unter Zugbelastung dargestellt. Die gestrichelten Linien gehören zu dem nicht verformten Körper. Die Last wird als Spannung  $\sigma_{yy}$  angelegt, wobei  $\sigma_{ij}$  die Last in j Richtung auf der normal zu dem Vektor  $e_i$  Fläche ist. Die Parameter  $\sigma_x$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  werden als Normalspannungen bezeichnet. Die Dehnung  $\varepsilon$  in y-Richtung ist definiert als (Archer et al. 1999):

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} \quad (1)$$

Dabei ist  $\Delta y$  die Längenänderung und  $y_0$  ist die ursprüngliche Länge. Die Elastizitätsmodul in y-Richtung ist definiert als (Archer et al. 1999):

$$E_y = \frac{\sigma_{yy}}{\varepsilon_y} \quad (2)$$

$E_y$  beschreibt das Verhältnis zwischen der Normalspannung und der Dehnung. Ein zweiter Parameter, der aus der gleichen Lastgestaltung gezogen wird, ist das Verhältnis zwischen der Kontraktion in x-Richtung und der Dehnung in y-Richtung unter einer Last in y-Richtung, die als Poisson-Zahl bezeichnet wird. Die Poisson-Zahl  $\nu_{yx}$  ist definiert als (Archer et al. 1999):

$$\nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (3)$$

In einem drei-dimensionalen Fall verursacht die Dehnung in y-Richtung nicht nur eine Querkontraktion in x-Richtung sondern auch in z-Richtung.

In Abbildung 6 rechts wird der Körper auf der gleichen Fläche belastet aber der Lastvektor wird jetzt in x-Richtung angelegt. Diese Spannung wird als Scherung  $\sigma_{yx}$  bezeichnet und wirkt tangential zur Körperoberfläche. Die Scherung ergibt eine Verformung des Körpers zu einem Parallelogramm. Die Schermodul  $G_{xy}$  korreliert die Schersteifigkeit bzw. der Schubmodul mit der Scherung  $\sigma_{ij}$  (Archer et al. 1999):

$$G_{xy} = \frac{\sigma_{yx}}{\gamma_{yx}} \quad (4)$$

Die eingeführten Parameter beschreiben das elastische Verhalten eines isotropen Körpers. In der Praxis weisen nicht alle Materialien isotrope Eigenschaften auf. Das bedeutet, dass das Verformungsverhalten der Körper nicht immer unabhängig vom verwendeten Koordinatensystem ist und dass das Elastizitätsverhalten zu zwei Moduln reduziert werden kann. Viele Materialien weisen anisotrope Eigenschaften auf. In diesem Fall wird das Elastizitätsverhalten durch 21 verschiedene Parameter beschrieben (S.G. Lekhnitskii 1963). Die linear elastischen orthotropen Materialien weisen symmetrische Eigenschaften in drei orthogonalen Ebenen auf. Die Schnittkanten dieser Ebenen werden als orthotrope Achse bezeichnet. Wenn ein kartesisches Koordinatensystem durch eine orthotrope Achse definiert ist,

sind die Materialeigenschaften entlang der Achsenrichtungen konstant und werden die elastischen Materialeigenschaften in 9 unabhängige Parameter reduziert (Kreißig und Benedix 2002). Diese 9 elastischen Konstanten sind:  $E_x, E_y, E_z, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}$  und  $\nu_{yz}$ .

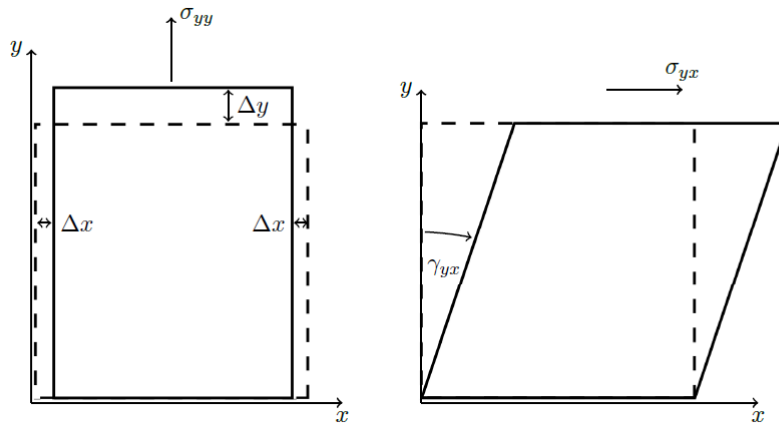


Abbildung 6: Körper unter Normalspannung (links) und Scherung (rechts) (Zinner 2013)

## 2.2.2 Materialcharakterisierung von Lithium-Ion-Batterien

In der Recherche der Materialcharakterisierung der Lithium-Ion-Batterien in der Automobilindustrie werden die Crash-Versuche als Schwerpunkt festgelegt. Forschungsarbeiten fokussieren sich auf der Sicherheit der Batteriezellen unter mechanischen Tests, wie z.B. Nagelpenetrationstest, Rundstab Crush Test und Pinch-Tests (Nguyen und Taylor 2004; Otsuki et al.; Cai et al. 2011).

Die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Wickels unter bestimmten Belastungsbedingungen wurden in der Literatur häufig untersucht. Shim et al. führt Zugversuche an Kupfer- und Aluminiumfolien durch, um Bildung von Graten zu modellieren (Shim et al. 2004). Die Zugfestigkeit des aktiven Materials wird zu der Steifigkeit der Bindermittel gleichgesetzt und ist weitgehend im Verhältnis gering (Liu et al. 2009). Sheidaei et al. untersuchen die Eigenschaften von Polypropylen-Separatoren, die eine starke Anisotropie aufweisen (Sheidaei et al. 2011). Der Herstellungsprozess des Separators verursacht die Porosität des Werkstoff bzw. dessen Anisotropie. Diese Ergebnisse bestätigen die Arbeit von Venugopal et al. (Venugopal et al. 1999).



---

Allerdings sind die Arbeiten, die alle Komponenten des Zellwickels betrachten, beschränkt. Sahraei et al. führten eine Reihe von mechanischen Test und Berechnungsmodelle auf kommerzielle LiCoO<sub>2</sub> Zellen von Handys durch. Die Ergebnisse zeigen, dass hohe Berechnungsaufwand zur Modellierung des Knickphänomens der Batterien gefordert ist. Daher müssen homogenisierte Materialmodelle für die Zellen entwickelt werden, die auf die Genauigkeit von Mikromodelle verzichten (Sahraei et al. 2012). Wierzbicki und Sahraei sind die ersten die eine Methode vorstellen, um eine durchschnittliche homogene Repräsentativ-Volumen-Element (RVE) zu ermittelt, die die drei Komponenten des Zellwickels betrachtet (Wierzbicki und Sahraei 2013). Lai et al. ermitteln die notwendige experimentelle Daten, um eine homogene Material zu entwickeln (Lai et al. 2013a).

Die in der Literatur vorgestellten Materialmodelle wurden für großen Verformungen entwickelt und weisen nicht lineare Verhältnisse auf. Sie berücksichtigen sowohl Knickphänomens als auch die Porosität der Werkstoffe. Ziel dieser Arbeit ist allerdings, die Entwicklung eines linearen Modells. Auf diesen Grund wird den Zellwickel als ein Laminarer-Verbundwerkstoff betrachtet.

---

### 2.2.3 Composite rule of mixture

---

In den Materialwissenschaften ist die „composite rule of mixture“ ein gewichteter Mittelwert, um die Eigenschaften eines von kontinuierlichen und unidirektionalen Fasern gebildeten Verbundmaterials zu prognostizieren (Askeland et al. 2011). Es bietet eine theoretische Ober- und Untergrenze für Materialeigenschaften wie z.B. Elastizitätsmodul, Massendichte, Wärmeleitfähigkeit und Leifähigkeit (Askeland et al. 2011). Im Allgemeinen gibt es zwei Modelle, eines für axiale Belastung (Voigt-Modell) (Voigt 1889) und eine für die Querbeltung (Reuss-Modell) (Reuss 1929).

In der Regel für manche Materialeigenschaften E, wie z.B. die Elastizitätsmodul, soll nach den „composite rule of mixture“ die Obergrenze der Eigenschaften in der Richtung der Faser (In-Plain) nicht größer sein als:

$$E_c = fE_f + (1 - f)E_m \quad (5)$$

---

Wobei  $f$  das Volumenverhältnis von dem Faser und  $E_i$  die Elastizitätsmodul des Faser  $f_a$  und der Matrix  $m$  sind.

$$f = \frac{V_{fa}}{V_{fa} + V_m} \quad (6)$$

Bei Querbelastungen (Out-of-Plane) werden die Eigenschaften als folgendes ermittelt:

$$E_c = \left( \frac{f}{E_f} + \frac{1-f}{E_m} \right)^{-1} \quad (7)$$

---

## 2.3 Strukturdynamik

---

Viele in dieser Arbeit verwendete Methoden basieren sich im Schwingungsverhalten von Komponenten. Strukturdynamik ist ein Wissensgebiet der Mechanik, die mit den Schwingungseigenschaften des Körpers beschäftigt. (Markert 2013)

---

### 2.3.1 Feder-Masse-Dämpfer-Systeme

---

Das Feder-Masse-Dämpfer-System ist das einfachste dynamische System. Es besteht aus einer Masse  $m$ , einer Feder mit Steifigkeit  $k$  und einem Dämpfungselement mit Dämpferkonstante  $c$ , vgl. Abbildung 7.

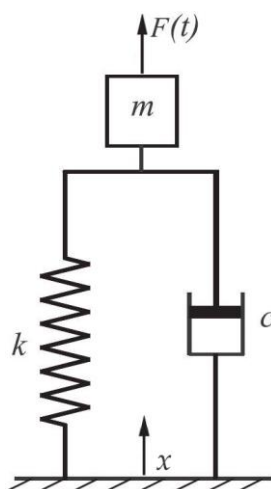


Abbildung 7: Feder-Masse-Dämpfer-Systeme (D. Giljohann)

---

Trotz seiner Einfachheit ist der Einmassenschwinger sehr wichtig, da jedes komplexe dynamische System mit  $n$  Freiheitsgraden in  $n$ -Systeme von Einmassenschwingern reduziert werden kann, welche die folgende Bewegungsgleichung haben, wobei  $F$  die äußere Kraft ist und  $x$  die Verschiebung:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (8)$$

Für den einfachsten Fall bzw. die freie, gedämpfte Schwingung ist  $F(t) = 0$  und die Bewegungsgleichung wurde vereinfacht als:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (9)$$

Eine andere Schreibweise der Bewegungsdifferentialgleichung für lineare autonome Schwingungssysteme mit einem Freiheitsgrad ist die Normalform:

$$\ddot{x} + 2Dw_0\dot{x} + w_0^2x = 0 \quad (10)$$

Die Parameter des Ersatzsystems und die Parameter der Normalform hängen voneinander ab:

$$w_0^2 = \frac{k}{m} \quad (11)$$

$$D = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (12)$$

Mit dem Ansatz

$$\hat{x}(t) = \hat{Y}e^{\lambda t} \quad (13)$$

$$\hat{x}(t) = \lambda \hat{Y}e^{\lambda t} \quad (14)$$

$$\hat{\dot{x}}(t) = \lambda^2 \hat{Y}e^{\lambda t} \quad (15)$$

---

Eingesetzt in Gleichung 10

$$(\lambda^2 + 2Dw_0\lambda + w_0^2)\vec{x}(t) = \vec{Y}e^{\lambda t}\hat{x}(t) = \hat{Y}e^{\lambda t} \quad (16)$$

mit  $e^{\lambda t} \neq 0$  und durch die Vernachlässigung  $\vec{Y} = 0$  als triviale Lösung wurde die folgende quadratische Funktion definiert:

$$\lambda^2 + 2Dw_0\lambda + w_0^2 = 0 \quad (17)$$

Wo die zwei Lösungen sind:

$$\lambda_{1,2} = -Dw_0 \pm iw_0\sqrt{1 - D^2} \quad (18)$$

Wen  $D < 1$ , was der Fall für die meisten strukturellen dynamische Systemen ist, können die Parameter  $\delta$  und  $w$  als folgende definiert werden:

$$\delta = Dw_0 \quad (19)$$

$$w = w_0\sqrt{1 - D^2} \quad (20)$$

Die Gesamtlösung ist:

$$\vec{x}(t) = \vec{Y}_1 e^{(-\delta + iw)t} + \vec{Y}_2 e^{(-\delta - iw)t} \quad (21)$$

Wenn

$$x(t) = \text{Re}[\vec{x}(t)], \quad (22)$$

$$A = \vec{Y}_1 \cos \phi_1 + \vec{Y}_2 \cos \phi_2, \quad (23)$$

$$B = \vec{Y}_1 \sin \phi_1 + \vec{Y}_2 \sin \phi_2, \quad (24)$$

$$x_0 = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (25)$$

Und

$$\tan \phi_0 = -\frac{B}{A}, \quad (26)$$

wurde die Gesamtlösung vereinfacht als:

$$x(t) = x_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \phi_0) \quad \tan \phi_0 = -\frac{B}{A}, \quad (27)$$

Abbildung 8 zeigt die Lösung des Systems. Diese ist eine Exponentialfunktion, die mit dem Dämpfungskoeffizienten abnimmt, moduliert durch eine Cosinus, der eine Periode  $w$  für  $x_0 = 1$ ,  $\delta = 0,3$ ,  $w = 4$  und  $\phi_0 = \frac{\pi}{4}$ . (Markert 2013)

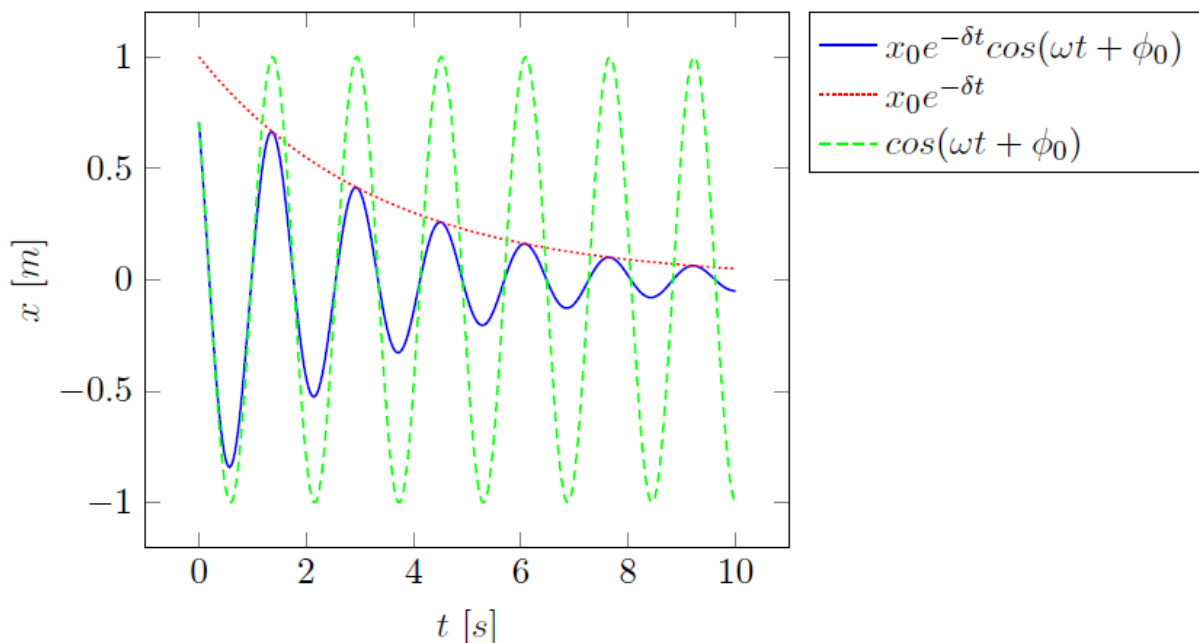


Abbildung 8: Lösung eines freien gedämpften Systems (Zinner 2013)

Systemverhalten unter harmonischer Kräfte ist relevant für viele strukturelle dynamische Probleme, z.B. Modalanalysen, die später in Kapitel 2.2.2 erläutert werden. Analog zum freien System kann Gleichung 8 in der Normalform geschrieben werden:

$$\ddot{x} + 2Dw_0\dot{x} + w_0^2 x = \frac{1}{m} F(t) \quad (28)$$

Für eine harmonische Kraft

---


$$\hat{F}(t) = \hat{F}_0 e^{i\Omega t}, \quad (29)$$

und der Ansatz

$$\hat{x}(t) = \hat{x}_0 e^{i\Omega t} \quad (30)$$

$$\hat{\dot{x}}(t) = i\Omega \hat{x}_0 e^{i\Omega t} \quad (31)$$

$$\hat{\ddot{x}}(t) = -\Omega^2 \hat{x}_0 e^{i\Omega t} \quad (32)$$

Ergeben:

$$(-\Omega^2 + i2Dw_0\Omega + w_0^2)\hat{x}_0 e^{i\Omega t} = w_0^2 \hat{u} e^{i\Omega t} \quad (33)$$

mit

$$w_0^2 \hat{u} e^{i\Omega t} = \frac{1}{m} \hat{F}_0 e^{i\Omega t} \quad (34)$$

Gelöst für  $\hat{x}_0$ , erweitert mit seiner komplexen Konjugate und verwenden:

$$\eta = \frac{\Omega}{w_0} \quad (35)$$

$$\hat{x}_0 = \frac{1}{1 - \eta^2 + i2D\eta} \cdot \hat{u} \quad (36)$$

Der Quotient aus der komplexen Antwortamplitude  $\hat{x}_0$  und der komplexen Erregeramplitude  $\hat{F}_0$  ist die dimensionslose komplexe Vergrößerungsfunktion des Schwingers,

$$\hat{V}_0 = \frac{1}{1 - \eta^2 + i2D\eta} \quad (37)$$

Die komplexe Vergrößerungsfunktion  $\hat{V}_0$  beinhaltet eine Amplituden- und eine Phaseinformation. Die Amplitudengang und Phasengang sind:

$$V_0 = |\hat{V}_0| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2D\eta)^2}} \quad (38)$$

$$\alpha = \arctan \frac{2D\eta}{1 - \eta^2} \quad (39)$$

$\hat{V}_0$  wurde als Übertragungsfunktion bezeichnet und beschreibt die Verhältnis zwischen der harmonische Kraft und dem Systemantwort. Eine Darstellung der Amplitude und der Phasen der Übertragungsfunktion wurden jeweilige in Abbildungen 9 und 10 gezeigt.

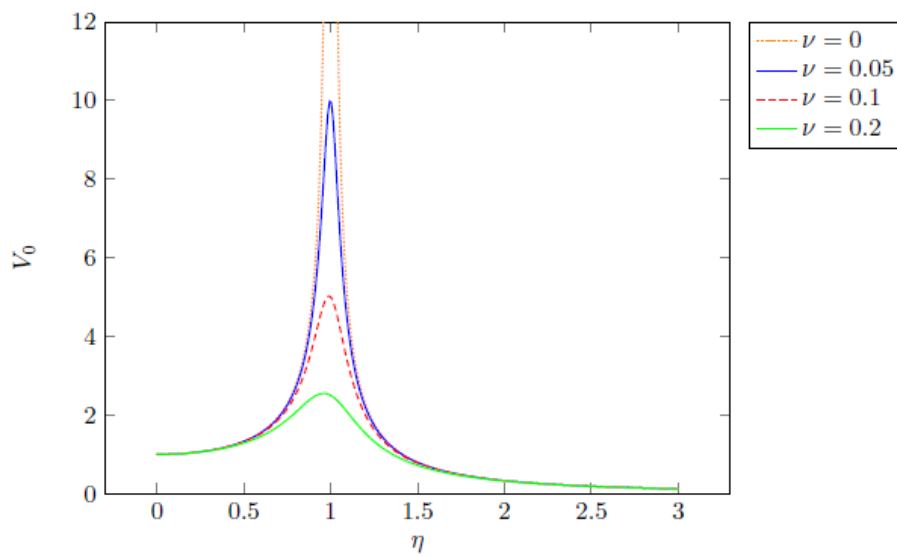


Abbildung 9: Amplitude der Übertragungsfunktion ( $\nu=D$ ) (Zinner 2013)

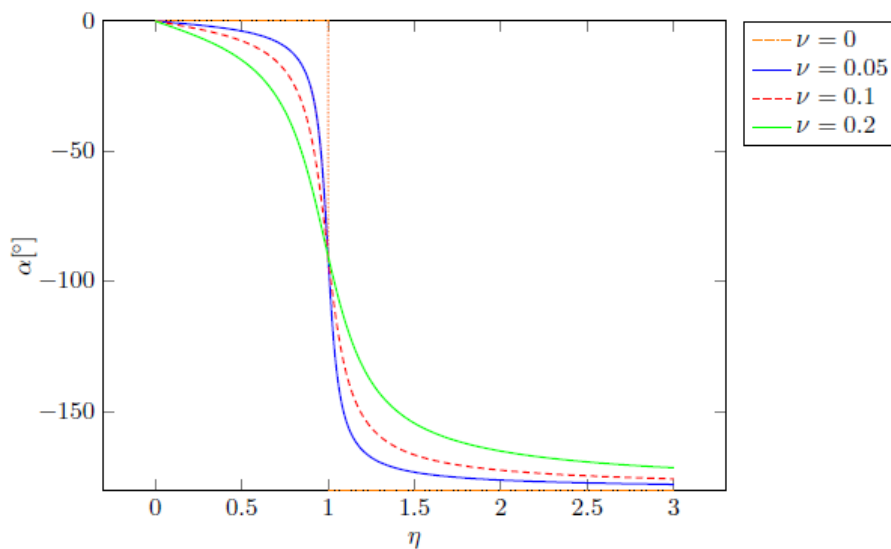


Abbildung 10: Phase der Übertragungsfunktion ( $\nu=D$ ) (Zinner 2013)

---

Die maximale Verstärkung ( $V_{0R}$ ) findet in der Resonanzfrequenzratio ( $\eta_R$ ) statt.

$$\eta_R = \sqrt{1 - 2D^2}, \quad (40)$$

$$V_{0R} = \frac{1}{2D\sqrt{1 - D^2}} \quad (41)$$

Die Resonanzfrequenz ( $\Omega_R$ ) kann schließlich als folgendes geschrieben werden: (Markert 2013)

$$\Omega_R = \sqrt{w_0^2 - \frac{c^2}{2m^2}} \quad (42)$$

---

### 2.3.2 Modalanalyse

---

Eine Modalanalyse ist die Untersuchung des Schwingungsverhaltens eines Systems. Sie wird in der Akustik, Aerodynamik und anderen technischen Bereiche verwendet, in denen dynamische Eigenschaften im Vordergrund liegen. Modalanalysen umfassen den Vorgang eine Komponente oder Struktur zu analysieren mit dem Ziel eine mathematische Beschreibung von deren dynamischem oder schwingendem Verhalten zu ermitteln (Ewins 2000). Dieses Kapitel ist eine kurze Einführung in die Modalanalyse und zeigt die Grundlagen der in dieser Thesis verwendeten Methoden.

Der theoretische Hintergrund einer Modalanalyse eines Systems ist die Lösung seiner Bewegungsgleichung. Ein dynamisches, harmonisches System mit  $n$ -Freiheitsgraden kann in ein System von  $n$ -Systeme mit einem Freiheitsgrad umgewandelt (Freyman 2011). Daher werden die Bewegungsgleichungen dieser Systeme in  $n$ -dimensionalen Vektoren und Matrizen zusammengefasst. Für ein ungedämpftes System mit  $n$ -Freiheitsgraden sehen die Gleichungen so aus:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}} + \mathbf{K}\vec{x} = \vec{f}, \quad (43)$$



---

wobei  $M, K \in \mathbb{R}^{n \times n}$  und  $\vec{F}, \vec{x} \in \mathbb{R}^n$ . Hierbei werden  $M$  und  $K$  Massen- und Steifigkeitsmatrix bezeichnet.

$$\vec{x} = \vec{X}e^{i\Omega t + \phi}, \quad (44)$$

und

$$\vec{f} = \vec{F}e^{i\Omega t}, \quad (45)$$

ergibt

$$\Omega^2 M \vec{X} + K \vec{X} = \vec{F}, \quad (46)$$

und somit das Eigenwertproblem

$$(\Omega^2 M + K) \vec{X} = \vec{F}. \quad (47)$$

Die Lösungen für  $\Omega$  sind die Resonanzfrequenzen und für  $\vec{X}$  die Modalvektoren. In dieser Arbeit wurden alle Modalanalysen mit FEM-Software durch numerische Methoden berechnet. Um die Ergebnisse zu validieren und kalibrieren, wurden auch experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Das in Rahmen dieser Arbeit verwendete Messungsverfahren für Strukturschwingungen wurde in folgendem Kapitel erläutert.

---

### 2.3.3 Laser Doppler-Vibrometer

---

Um das Schwingungsverhalten einer Struktur zu messen, müssen Auslenkungen in verschiedenen Positionen aufgezeichnet werden. Ebenso müssen die Phasenverschiebung zwischen Anregung und Ablenkung ermittelt werden, mit der das Schwingungsverhalten richtig beschrieben wird. Eine Möglichkeit ist die Messung mit einem Laser Doppler-Vibrometer (LDV), das einen von der Struktur reflektierten Laserstrahl verwendet. Der Vorteil ist, dass keine Störungen aufgrund des Messwerkzeugs in dem System eingetragen werden. Wenn die Oberfläche des Systems schwingt, erfährt der Strahl eine Doppler-Verschiebung, die die Frequenz des Laser-Strahls verändert. Das Laser-Doppler-Vibrometer misst die Frequenzverschiebung durch einen Interferometer, die in Abbildung 11 dargestellt wird. Das

Laser Doppler-Vibrometer erschafft einen Laserstrahl, die in einem Referenz- und Messstrahl getrennt wird. Der Messstrahl wird durch einen optischen Modulator geführt, um deren Frequenz zu erhöhen. Dann wird der Messstrahl von der Prüfkörper reflektiert. Der reflektierte Messstrahl wird mit dem Referenzstrahl zusammengefügt. Schließlich wird der sich ergebende Stahl in einem Sensor geleitet. Wenn der Prüfkörper in Ruhe ist, wird die von dem Sensor gemessene Intensität durch die Frequenzverschiebung des optischen Modulators verursacht. Wenn die Oberfläche näher von dem Variometer steht, steigt die Frequenz des Messstrahls und die Frequenzverschiebung des optischen Modulators. Wenn die Oberfläche weit von dem Vibrometer steht, sinkt der Frequenzverschiebung des optischen Modulators. Die Ausgangsfrequenz des Laserstrahls ist hoch genug, dass der Sensor nur auf der Frequenzverschiebung des optischen Modulators und des Doppler-Effekt. Die Frequenzverschiebung wird im Vibrometer ausgewertet und als Spannungssignal oder digitaler Datenstrom ausgegeben. (Enrico Primo Tomasini 2006)

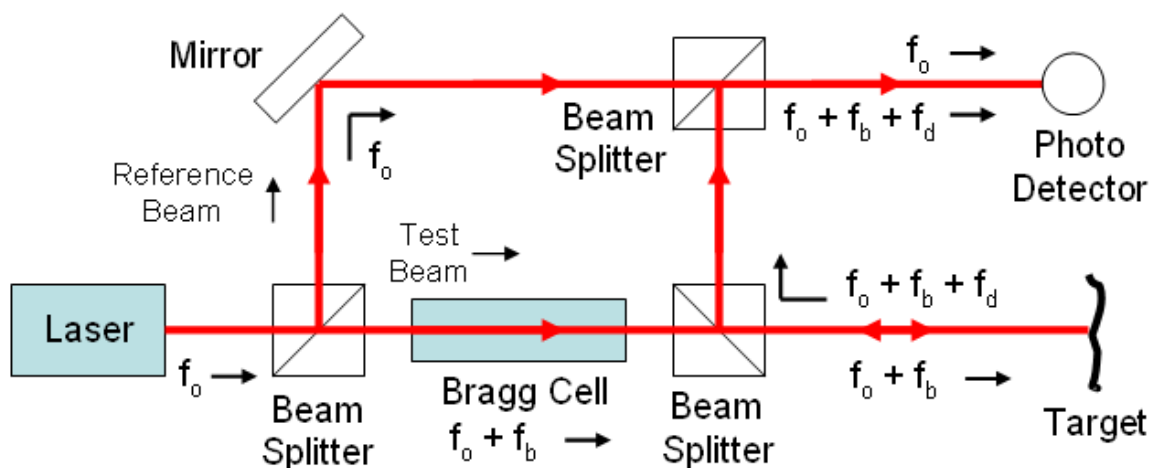


Abbildung 11: Funktionsprinzip eines Laser-Doppler-Vibrometers (Laderaranch 2008)

## 2.4 Finite Element Methode

Die FEM ist grundsätzlich eine Interaktion von Algorithmen, Methoden und Techniken von verschiedene wirtschaftlichen Bereichen, die eine ungefähre Prognose des Verhaltens von nicht diskrete Systeme ermöglicht. Sie wird in viele Verwendungsfelder verwendet, wie z.B. Fluidodynamik, Elektromagnetismus, oder Akustik, unter anderen. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine dynamische Analyse von den Bauteilen eines Zellmoduls mit Hilfe des ANSYS Workbench durchgeführt. Die Finite Element Methode wird verwendet, um Systeme mit

---

komplexen Geometrien zu lösen. Die Geometrie wird in eine endliche Anzahl von kleinen Elementen geteilt. Diese Elemente weisen einfache Geometrien auf, dessen Wechselwirkung miteinander durch analytische Methoden berechnet werden kann. Jedes Element besteht aus Knoten mit verschiedenen Freiheitsgraden, z.B. Rotation und Translation, die zu den benachbarten Knoten durch physikalische Bedingungsgleichungen gekoppelt sind. Das reduziert ein komplexes System zu einer Reihe von Gleichungen, die für verschiedene Randbedingungen durch einen FE-Solver gelöst werden können. Sowohl die Berechnung von Bedingungsgleichungen als auch die Lösung jedes Elements werden automatisch bei moderner FE-Software ermittelt. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird die Antwort des gesamten Systems berechnet. Die berechnete Systemen weist aufgrund der Vereinfachungen immer eine Abweichung zu den realen Systemen auf. Diese Abweichung kann durch eine Steigerung der Elementanzahl verringert werden, wenn sowohl die Randbedingungen als auch physikalische Eigenschaften des Modells richtig modelliert sind. Allerdings verursacht gleichzeitig eine Steigerung der Elementanzahl die Erhöhung der Berechnungszeit. Im Rahmen dieser Arbeit werden Homogenisierungsmethoden verwendet, um komplexe Systeme mit einer kleinen Elementanzahl und genug Genauigkeit zu modellieren.

---

#### **2.4.1 Simulationsmethode der Lithium-Ionen-Zelle in der Fahrzeugsimulation**

---

Hauptprobleme bei der Durchführung von realen Versuchen mit Zellen und Zellmodulen sind Zeit- und Kostenaufwand. Ebenfalls sind beim Versagen der Zellen austretende Schadstoffe für den Prüfer ungesund. Aus diesem Grund ist die Finite Elemente Methode in der Entwicklung von Li-Ionen-Batterien von großer Bedeutung. Sie ermöglichen die Bewertung der Auslegungen in der Entwicklungsphase und die Entdeckung der Schwachstellen, was Kosten und Zeit spart. Abbildung 12 zeigt den allgemeine Ablauf einer FEM-Simulation.

- Im CAD-System werden Einzelteile, Gruppen und Zusammenbauten angefertigt. Aus dieser Konstruktionsgeometrie ist eine Berechnungsgeometrie abzuleiten. Dabei wird die Geometrie so vereinfacht, dass die Geometrie für spätere Vernetzung möglich ist. (Klein 2015)
- Über die Schnittstelle können die CAD-Daten ins FEM-Programm importiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird die Schnittstelle über STEP-Files realisiert. (Klein 2015)

- 
- Mithilfe des Pre-Prozessors wird die Geometrie zu einem FE-Modell weiter aufbereitet. Im ersten Schritt werden die Makros gebildet, aus denen über die Angabe von abgestimmten Seitenteilern ein Elementnetz generiert werden kann. Im zweiten Schritt werden die Werkstoffkennwerte zu den Bauteilen zugewiesen. Im dritten Schritt werden die Randbedingungen, die Kontaktbedingungen und die Kräfte, die den Umgebungen von der Bauteilen und Komponenten darstellen können, definiert. Im letzten Schritt wird eine Input-Datei erstellt und nach Fehler gecheckt. (Klein 2015)
  - Mit dem Solver werden die Gleichungssysteme mit dem ausgewählten Berechnungsverfahren gelöst. Die Verschiebungen und Spannungen werden während der Berechnung weitergegeben. Je nach Anzahl der Knoten und dem Umfang des Outputs dauert die Berechnung sehr unterschiedlich. Ziel ist ein möglichst genaues Ergebnis mit einer möglichst geringen Berechnungszeit. (Klein 2015)
  - Im Post-Prozessing werden die Verformungen der Struktur, die Spannungsverteilungen und die Energien dargestellt. Hieraus wird die Qualität der Ergebnisse bewertet. Beim Bedarf wird das Modell verändert und die Berechnung wiederholt, bis sie genaue Ergebnisse liefert. (Klein 2015)

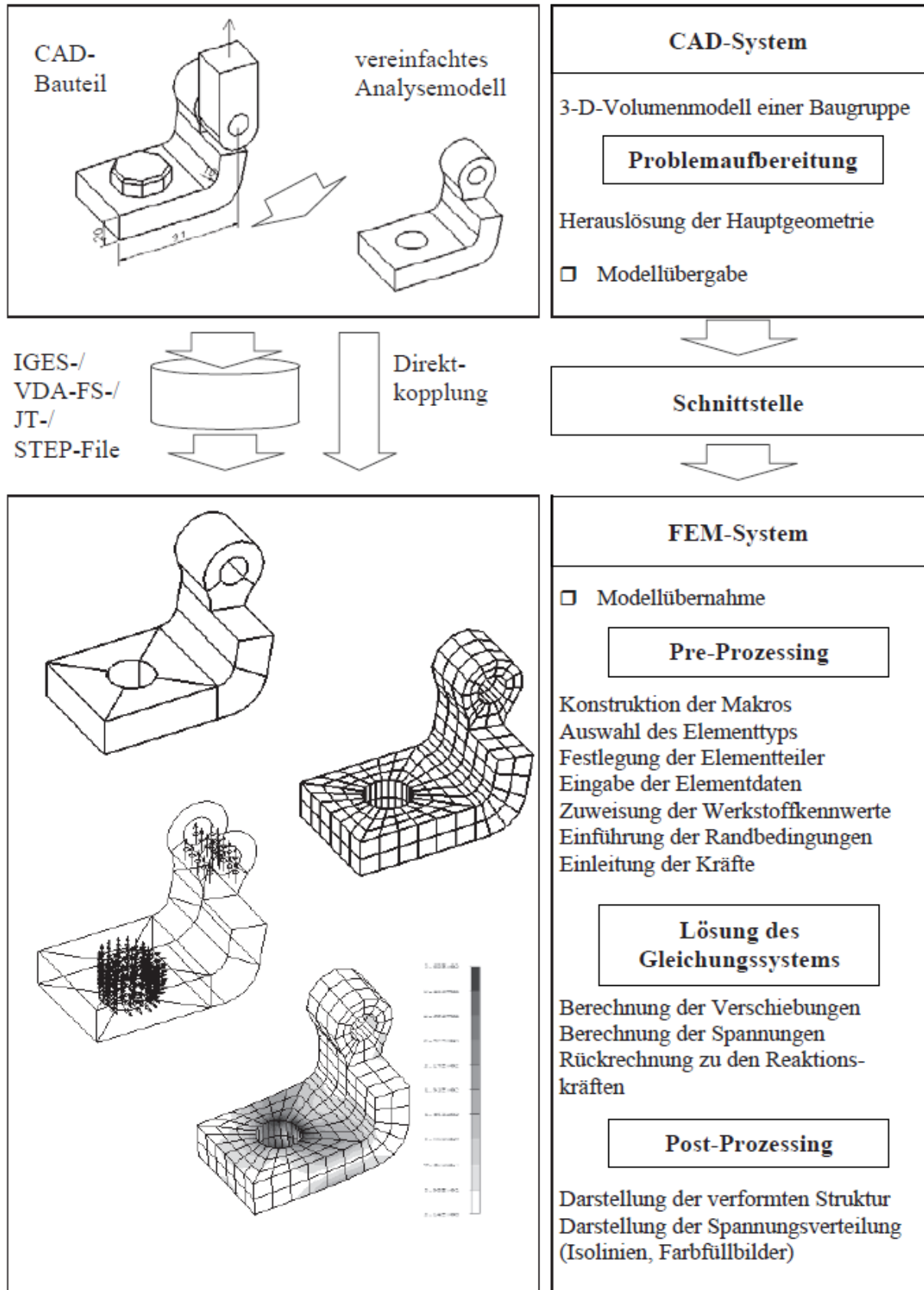


Abbildung 12: Beispiel des FEM-Prozess (Klein 2015)

---

## 2.4.2 Simulationsmethodik zur Abbildung der Li-Ionen-zelle

---

Zur Gewährleistung einer günstigen Modelgröße und Berechnungszeit ist die Elementgröße bei der FEM-Simulation für die Gesamtfahrzeug-Simulation begrenzt. Zusätzlich sollen komplexen Geometrie in der FE-Modellierung vereinfachen, zum Beispiel werden die kleiner als 4-5 mm Elemente entfernt oder ersetzt. In Abbildung 13 wird eine zylindrische Zelle mit dem entsprechenden FE-Modell verglichen. (Thaler und Watzenig 2014)

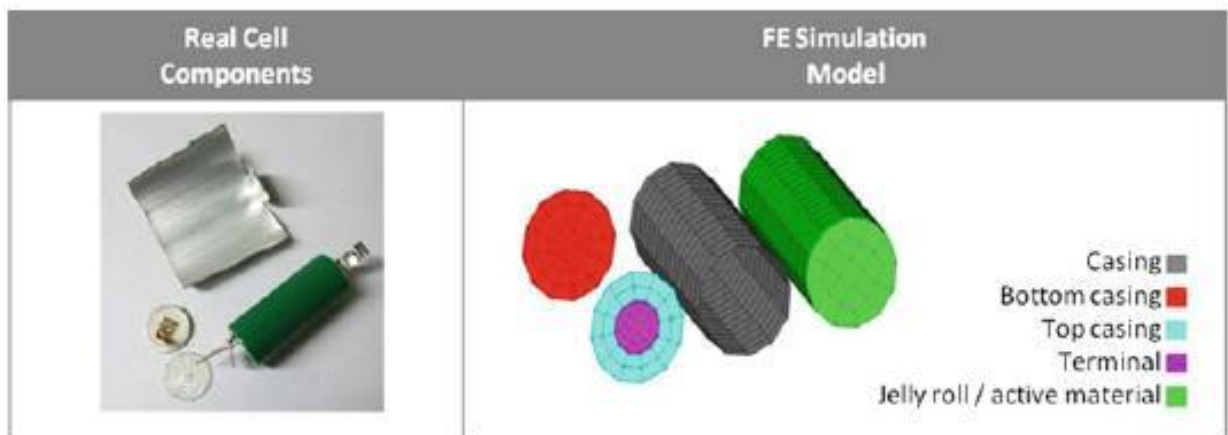


Abbildung 13: Beispiel des FEM-Prozess (Thaler und Watzenig 2014)

Elektro- und Hybridfahrzeuge erfordert aufgrund den neuen verwendete Komponenten die Entwicklung von neue Methode zur Modellierung der Verformung und des Versagens von neuen Fahrzeugkomponenten, z.B. Zellwickel oder HV-Kabel. (Thaler und Watzenig 2014)

Der Zellwickelt besteht aus übereinander liegenden und gewickelten Folien von Anode, Separator und Kathode. Zusätzlich wird die Zelle mit Elektrolyt aufgefüllt. Der Aufbau eine zylindrische Zelle wird in Abbildung 14 dargestellt. Um eine ausführliche Charakterisierung der Komponenten einer Zellwickle und deren Interaktionen zu modellieren, sollte eine detaillierte numerische Analyse durchgeführt werden. Das erfordert ein hohe Elementanzahl und Anforderungen aus Model. Daher werden vereinfachte makromechanische Elemente verwendet (Abbildung 14 c), die das mechanische Verhalten der Zellwickel annähert. (Greve und Fehrenbach 2012)

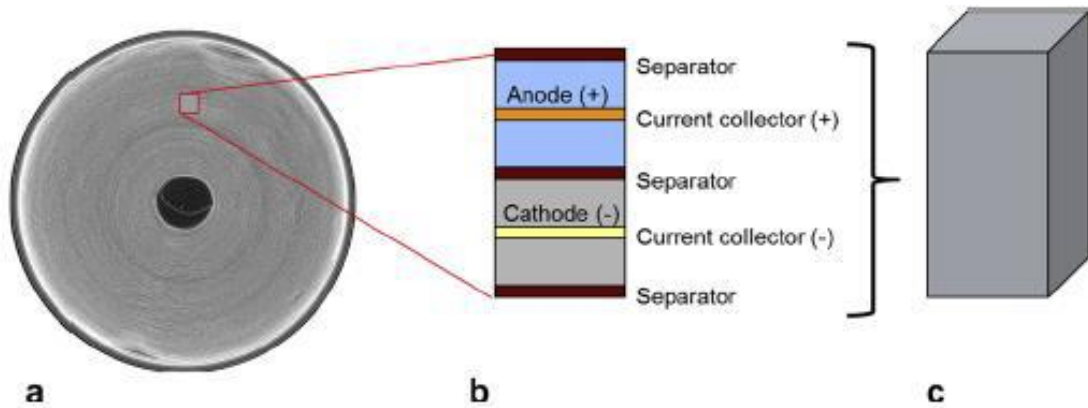


Abbildung 14: a) Querschnitt der Zellwickel einer Zylindrischen Zelle; b) Detaillierte Darstellung der Schichten; c) FEM-Ersatzelement für den Ausschnitt in b) (Greve und Fehrenbach 2012)

## 2.5 Modell-Updating-Verfahren

Das Ziel des Modell-Updating-Verfahrens ist grundsätzlich die Verbesserung der Korrelation zwischen einem numerischen Modell und einem reellen System (Schittkowski 1986). Das bedeutet, dass die gewünschten numerischen Modelle experimentelle Ergebnisse simulieren sollen.

Die Qualität des numerischen Modells, das durch das Update von einem Ausgangsmodell in Bezug zu experimentellen Ergebnisse erlangen wird, ist bei verschiedenen Fehler beeinflusst. Grundsätzlich werden diesen Fehler in drei Gruppe untergeteilt (Friswell und Mottershead 1995):

- Zu dem numerischen Modell zugeordnete Fehler,
- zu dem verwendeten Updating-Verfahren zugeordnete Fehler und
- zu dem gemessene Data zugeordnete Fehler.

Die numerischen Modelle sind Abstraktionen von reellen Systeme und basieren sich auf verschiedene Annahmen. Sowohl die gewählte Diskretisierung als auch die verwendete Randbedingungen spielen eine wichtige Rolle in der Modellqualität.

---

Bei der Modell-Kalibrierung durch Modaldaten wird die Annahme verwendet, dass das System ein lineares, strukturelles Verhalten aufweist. Allerdings ist das dynamische Verhalten von reellen Systeme nicht immer linear. Ebenso liegt die Auswahl der Parameter, die das Updating-Verfahren beinhalten soll, im Vordergrund. Einerseits soll gewährleistet werden, dass die am relevantesten Parameter bzw. die mehr sensibler Parameter bei dem Vorgang verwendet werden. Andererseits soll die Parameteranzahl geringer wie möglich gehalten werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse nicht zu verwickeln.

Abhängig von dem gewählten Updating-Verfahren können verschiedene Fehler auftreten. Während direkte Methoden numerische Fehler leiden können, können indirekte Methoden Konvergenzprobleme aufweisen. Ebenso hat die Auswahl einer geeigneten Optimierungsfunktion großen Einfluss auf die Ergebnisse des Updating-Verfahren.

Weitgehend ist die Genauigkeit der gemessenen Daten begrenzt. Die Messungen werden oft von Störfaktoren beeinflusst, wie elektronische Rauschen oder zusätzliche Anregungsquellen. Ebenfalls können eine unzureichende Anzahl von Messensoren zu schlechte Ergebnisse führen. (Friswell und Mottershead 1995)

---

### 2.5.1 Mode Pairing-Kriterien

---

Eine Wichtige Voraussetzung im Design von Bauteilen ist es in der Lage zu sein, experimentelle Ergebnisse von reellen Systeme mit vorhergesagten Ergebnissen von FEM zu vergleichen. Damit die Gültigkeit der Model abgestimmt werden kann. Die modal assurance criteria (MAC) sind ein sehr häufig verwendetes Verfahren, um den Korrelation zwischen Eigenvektoren abzuschätzen. Die MAC wird oft verwendet, um Schwingformen von analytischen Modellen mit den in Experimenten ermittelten Schwingformen zu vergleichen. Es ist einfach zu verwenden und erfordert nicht die Ermittlung der Systemmatrizen. Die MAC zwischen einen gemessenen Mode  $\phi_{mj}$  und einem analytischen Mode  $\phi_{ak}$  wird als folgende beschrieben: (Friswell und Mottershead 1995)

$$MAC_{jk} = \frac{|\phi_{mj}^T \phi_{ak}|^2}{(\phi_{ak}^T \phi_{ak})(\phi_{mj}^T \phi_{mj})} \quad (48)$$



---

Die MAC-Werte liegen zwischen 0 und 1. Ein Wert von 1 bedeutet, dass ein Eigenvektor ein Vielfaches des anderen ist. Die experimentellen und analytischen Eigenvektoren sollen die gleiche Anzahl von Elementen enthalten, obwohl deren Skalierung nicht die gleiche sein muss. Weitgehend werden alle analytischen Moden mit allen gemessenen Moden korreliert und in einer Matrix platziert. Wenn die Moden in der gleichen Reihenfolge angeordnet sind, wird die MAC-Matrix Werte auf der Diagonale Werte nahe 1 und auf den anderen Stellen Werte nahe 0 enthalten. Der Zähler von Gleichung 48 ist das Quadrat des Skalarprodukts der Vektoren  $\phi_{mj}$  und  $\phi_{ak}$ . Auch wenn die experimentellen und analytischen Moden identisch sind, sind die Skalarprodukte von  $\phi_{mj}$  und  $\phi_{ak}$  ( $j \neq k$ ) weitgehend nicht 0. Das liegt daran, dass  $\phi_{mj}$  und  $\phi_{ak}$  sind orthogonal zu dem Maß- und Steifigkeitsmatrix ( $\phi_{mj}^T \mathbf{M} \phi_{ak} = \phi_{mj}^T \mathbf{K} \phi_{ak} = 0$ ) und nicht direkt mit einander ( $\phi_{mj}^T \phi_{ak} \neq 0$ ).

---

## 2.5.2 Kalibrierung durch Optimierung

---

Die Optimierungsverfahren sind häufig verwendete Verfahren, um numerische Modelle zu kalibrieren. Im Vergleich zu anderen Methoden ist ihre Anwendbarkeit sehr flexibel. Eine Optimierung ist immer ein iterativer Vorgang. Aus diesem Grund werden beträchtliche Anzahl von Lösungen des jeweiligen Systems (beispielsweise eine numerische Modalanalyse) berechnet, um ein Optimum zu finden. Wenn die Zielfunktion mehrere lokale Extrema hat, kann das gewählte Optimierungsverfahren Probleme erzeugen werden. Deshalb ist die Wahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus für das jeweilige Problem von wesentlicher Bedeutung. (Zabel und Brehm 2009)

Weitgehend werden drei Gruppen von Standard-Optimierungsmethode unterscheiden:

- Gradient-basierte Methoden
- Evolutionäre Algorithmen
- Response-Surface-Methoden (RSM) und Adaptive-Response-Surface-Methoden (ARSM)

---

Gradient-basierte Optimierungsalgorithmen, die Quasi-Newton-Methoden verwenden, wie NLPQL und LBFGS (Nonlinear Programming using a Quadratic or Linear least-square algorithm), fangen mit vordefinierten Ausgangsparametern an. Line-Suchalgorithmen gewährleisten die Konvergenz durch Gradienten. Wenn die Zielfunktion lokale Extrema hat und die Ausgangsparameter in der Nähe von denen befinden, wird der Algorithmus zu dieser lokalen Extrema konvergiert und nicht zu dem globalen Optimum. Aufgrund dessen werden Gradienten-basierte Verfahren zur Lösung von nichtlinearen Optimierungsprobleme unter folgenden Einschränkungen empfohlen: (Zabel und Brehm 2009)

- Die Anzahl der Variablen sollte nicht zu groß sein.
- Die Funktionen und Gradienten können mit ausreichend hoher Genauigkeit ausgewertet werden.
- Das Problem sollte glatt und gut skaliert werden.

Im Gegensatz zu den Gradienten-basierten Methoden gehören evolutionäre Algorithmen zu den stochastischen Optimierungsverfahren. Sie bilden biologische Evolutionsprozesse wie Anpassung, Selektion und Variation nach. Zur Verbesserung der Lösungsannäherung des Optimierungsproblems sucht eine Population von Individuen dem „design space“ für mögliche Lösungen durch die Darwins Prinzip der „survival of the fittest“ ab. Die drei Hauptarten sind genetische Algorithmen, evolutionäre Strategien und evolutionäre Programmierung. Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie globale Extrema in Gegenwart von lokalen Extrema besser als andere Optimierungsmethoden finden können. Nachteil ist der hohe Berechnungsaufwand wegen der großen Anzahl der Modellösungen, die berechnet werden müssen. Evolutionäre Algorithmen sollten angewendet werden: (Zabel und Brehm 2009)

- in den Fällen, in denen Gradienten-basierte Methoden und Antwortoberflächen Annäherungen scheitern,
- in Problemen, bei denen diskrete oder Binärgrößen die Reaktion dominieren,
- in Optimierungsprobleme mit höheren Anzahl von variable oder Einschränkungen

Die Analysen mit Reaktionsoberflächenverfahren werden in zwei Schritte durchgeführt. Zuerst wird die Antwortoberfläche durch eine Annäherungsfunktion auf einem geeigneten Satz von

---

diskrete Antwortpunkte erzeugt. Die Optimierung wird dann auf die Antwortoberfläche durch Gradienten-basierte oder evolutionäre Algorithmen durchgeführt. Verschiedene Methoden wie der kleinsten Quadrate oder kleine Bewegungen Quadrate (Moving least square) werden zur Ermittlung der Reaktionsoberflächen verwendet. Es ist sehr wichtig, dass die Reaktionsoberfläche die globalen Trends des Optimierungsproblems gut darstellt. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist seine extrem schnelle Konvergenz. Dieser Verfahren wird oft bei glatten Optimierungsproblemen verwendet, die nicht mehr als 10 Variable haben.

---

### 3 Simulative Modalanalyse

---

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Simulationenmethoden erläutert und die Simulationsergebnisse gezeigt. Die Simulationen werden mit Versuchsergebnissen später kalibriert und validiert. Ziel der Simulation ist es das Steifigkeits- und Schwingverhaltens der Zellen und Zellmodul abzubilden. Dazu soll das numerische Modell die mechanischen Eigenschaften der Zelle und des Zellmoduls gut darstellen und auch effizient berechnen können.

---

#### 3.1 Aufbau des FE-Modells der Zell

---

Zur Reduzierung der Komplexität und der Rechenzeit der Simulation bildet das FE-Modell nur relevanten Aspekten der Realität. Das Zellmodell lässt sich in zwei Komponenten unterteilen: Das Zellgehäuse und der Zellwickel. Im Rahmen dieser Arbeit wird die mechanischen Eigenschaften des Zellwickels durch ein Ersatzmaterial bzw. Relativ-Volumen-Element (RVE) in der Simulation abgebildet, vgl. Abbildung 15. Dieses Ersatzmaterial weist orthotrope Materialeigenschaften auf.

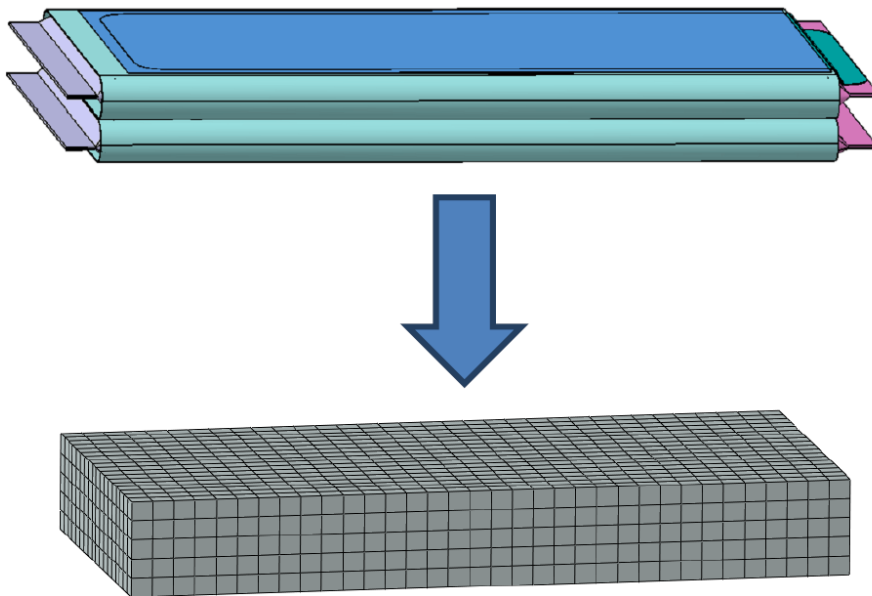


Abbildung 15: Ersatzmodell für den Zellwickel

---

Ebenso wird die Geometrie des Zellwickels vereinfacht. Um die Abmessungen der neuen Geometrie zu ermittelt, wird gefordert, dass sie sich für kleine Auslenkungen genau wie die ursprüngliche Geometrie verhält. Dazu wird ein Kalibrierungsverfahren entwickelt.

Um die Materialeigenschaften des homogenen RVE zu ermittelt, werden die in Lai et al. (Lai et al. 2013a, 2013b; Ali et al. 2013) ermittelte Materialeigenschaften des Anodes, Separator und Kathode verwendet. In diesen Arbeiten werden Zug- und Druckversuche in In- und Out-of-Plane von den Zellkomponenten durchgeführt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Aktivmaterialien von Anode und Kathode bei Zugversuchen in In-Plane-Richtung keine Spannungen tragen. Die Metallfolien von Kupfer und Aluminium sind in diesem Fall verantwortlich für die Steifigkeit. Diese Annahme ermöglicht die Bestimmung des Materialverhältnisses von Anode und Kathode in In-Plane-Richtung durch die in Abschnitt 2.2.3 erläuterte rule of mixture. Die Zugversuche vom Separator in der In-Plane-Richtung zeigen ein Elastizitäts-Modul  $E_s$  im Verhältnis zum Anode und Kathode sehr klein. Ebenso ist sein Volumenverhältnis  $f_s$  auch gering. Um die Elastizitätsmodul des RVE in In-Plane-Richtung zu berechnen, wird Gleichung 49 verwendet, wobei  $E_i$  und  $f_i$  die jeweilige Elastizitätsmodule und Volumenverhältnis für Anode, Kathode und Separator sind. Da der Separator keinen großen Einfluss hat, wird nicht berücksichtigt.

$$E_{RVE} = E_A f_A + E_K f_K + 2E_s f_s \quad (49)$$

Bei Out-of-Plane Versuchen stellen Lai et al. fest, dass die Materialeigenschaften des RVE sehr stark von der Porosität der Komponenten abhängen. Die Porosität verursacht ein nicht lineares Verhalten bereits bei kleinen Auslenkungen. Abbildung 16 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von drei Druckversuchen in Out-of-Plane-Richtung von einem RVE. Im Rahmen dieser Arbeit werden kleine Auslenkungen betrachtet (0-1%). Die Elastizitätsmodul in Out-of-Plane-Richtung kann nicht durch die rule of mixture ermittelt. Um einen Ausgangsparameter zu definieren, wird eine Gerade (grün) für kleine Auslenkungen dargestellt, vgl. Abbildung 16. Die Steigung dieser Gerade wird als Elastizitätsmodul verwendet.

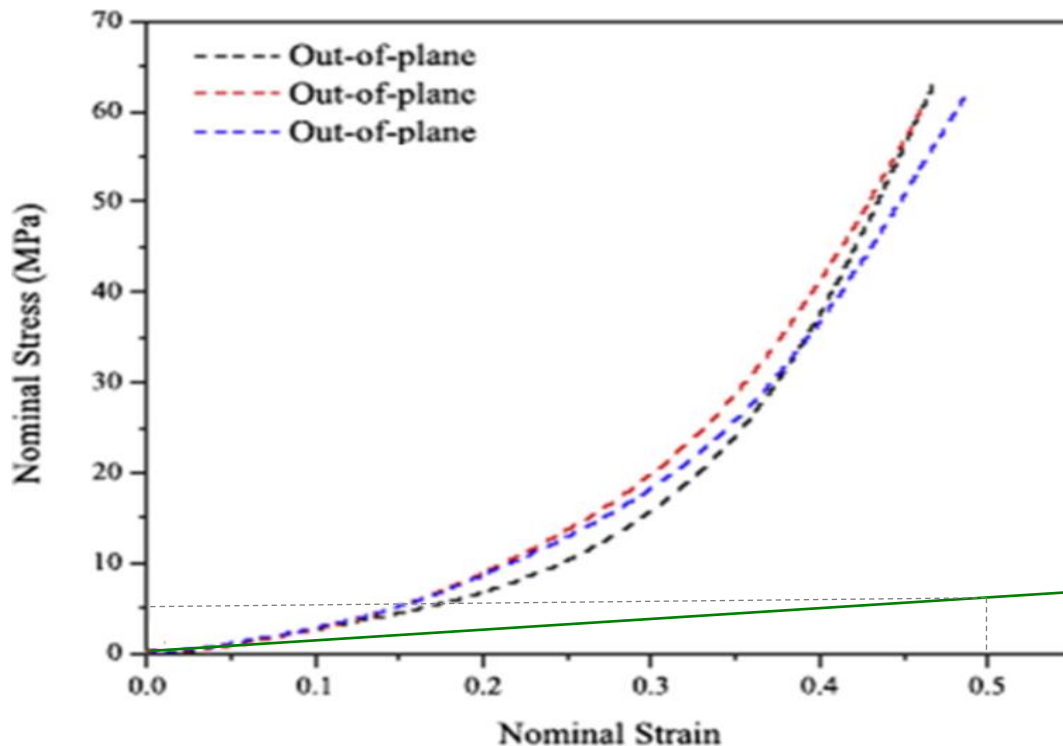


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von einem Druckversuch in Out-of-Plane-Richtung (Lai et al. 2013a)

### 3.2 Aufbau der Zellmodulsimulation

Bei der Herstellung des Zellmoduls werden die 16 Zellen zusammengepresst. Dieser Prozess hat einen wichtigen Einfluss auf der Steifigkeit des Systems bzw. auf die Schwingverhalten. Aus diesen Grund wird überprüft, ob diese Vorspannung in der Simulation abgebildet werden muss.

Für den Aufbau des Simulationsmodells des Zellmoduls wird zuerst jede Komponente einzeln modelliert. Die Konstruktionsgeometrie von jedem Bauteil wird in einen Preprozessor importiert, in dem die Geometrie vereinfacht wird. Da alle Bauteile geringe Wandstärken aufweisen, werden sie mit Shell-Element abgebildet. Dazu muss die Geometrie nachbearbeitet werden und die Mittelflächen erstellt werden. Die erzeugten Mittelflächen werden unter die folgenden Anforderungen vernetzt:

- Es ist eine Element-Kantenlänge von min. 4mm einzuhalten,
- die Anzahl von TRIA-Elementen darf 5% nicht überschreiten,
- nur Radien größer als 0,5 mm Elementkantenlänge abbilden,
- 4-Knoten-Schalenelemente sind zu bevorzugen
- Warping maximal 15 Grad

- Viercksinnenwinkel zwischen 40 und 140 Grad einzuhalten und
- Seitenverhältnis maximal 4

Die verwendete Verbindungstechnik beim Modulaufbau besteht grundsätzlich aus Schweißverbindungen, die die Bewegung zwischen die Komponenten in alle Raumrichtungen sperren. Die Dämpfungs- und Steifigkeitseffekten dieser Schweißnaht auf der Simulation werden aufgrund dessen niedrige Einfluss nicht betrachtet. Abbildung 17 zeigt den Prozess, durch den die Vorspannung im Zellmodul erzeugt wird. Zuerst werden die Zellen miteinander verpresst (a). Dann werden die Rahmenbleche mit der Rahmenplatte verschweißt (b) und schließlich dehnt sich das ganze Zellmodul bis zum Gleichgewicht der Kräfte.

Als Randbedingungen werden Kräfte und Auslenkungen für die Vorspannung definiert. An der Rahmenplatte wirken zwei Kräfte, die die Vorspannung des Zellmoduls verursachen. Diese werden nach der Verbindung zwischen Rahmenblech und Rahmenplatte entfernt. Da es sich um eine frei/frei Modalanalyse handelt, wird keine Lagerung modelliert sowie keine Auslenkungen definiert.

Für den Aufbau der virtuellen Prüflinge wurden die gleichen Subkomponenten (Mesh). Wie Abbildung 18 zeigt, treten nach der Modulfertigung die größeren Spannungen auf den Rahmenbleche auf.

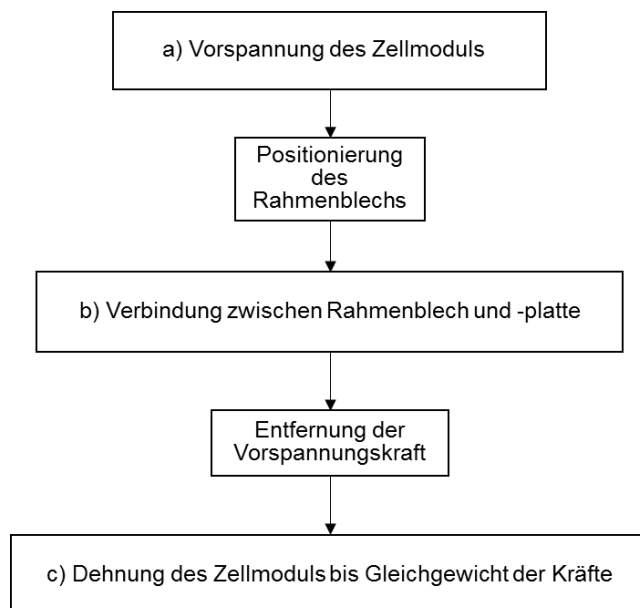


Abbildung 17: Modellierung des Aufbaus eines Zellmoduls

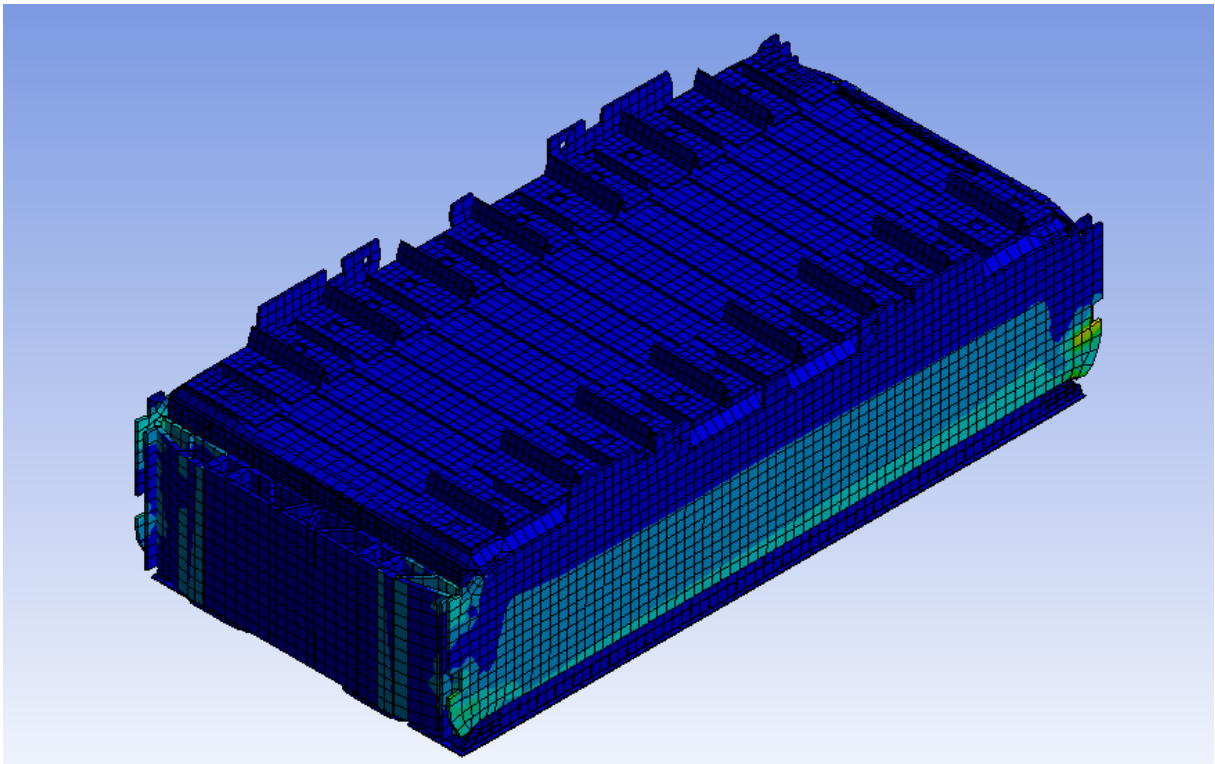


Abbildung 18: Modellierung des Aufbaus eines Zellmoduls

---

### 3.3 Simulationsergebnisse

---

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der FEM-Modalanalyse und Vorspannungssimulation der verschiedenen Prüflinge zusammengefasst und diskutiert.

Die Auslenkungen der Zellmodule bei der Vorspannung kann nicht direkt mit den realen Auslenkungen verglichen werden, da die realen Zellmodule bei der Vorspannung auf Grund der zwischen die Komponente existierenden Toleranz ein nicht lineares Verhalten aufweisen. Aufgrund dessen wurde zusätzlich auch eine nicht-lineare Simulation durchgeführt, die ein gemessenes reales Zellmodul modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass das verwendete Modell bei der Vorspannung die Realität darstellt.

Die numerische Modalanalyse ergibt eine große Anzahl von Schwingformen für jede Prüflinge im Bereich von 0 Hz bis 4 kHz. Beim Modulrahmen treten die Schwingungen deutlich in Rahmenblech und Rahmenplatte getrennt auf. Gegen 60Hz erscheinen die erste Biegemode



---

vom Rahmenblech und gegen 1000 Hz von der Rahmenplatte, vgl. Abbildung 19. Von 40 Hz bis 3 kHz werden 213 verschiedene Schwingmoden des Modells berechnet.

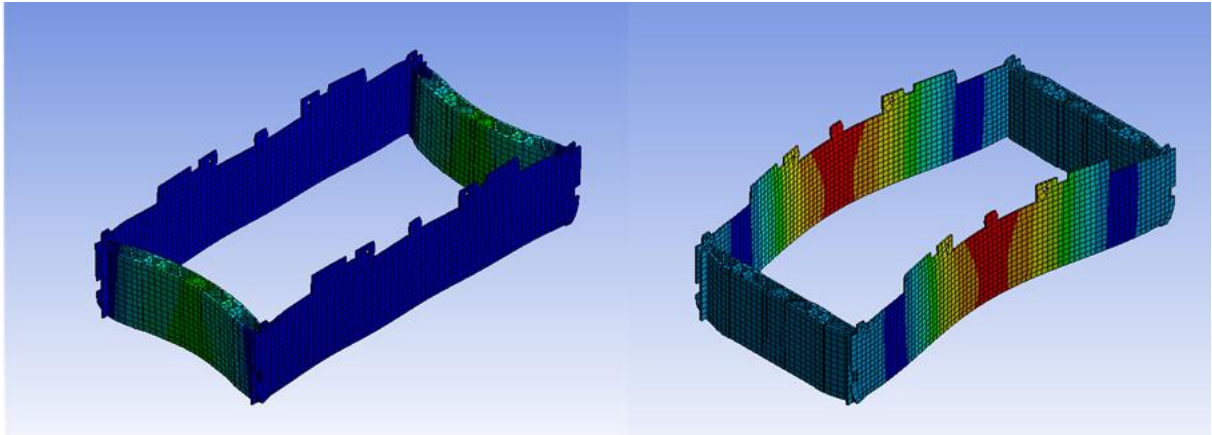


Abbildung 19: erste Biegeschwingung des Rahmenplattes (links), erste Biegeschwingung des Rahmenblechs

Bei den Zellmodulen werden simulativen Modalanalysen mit und ohne Vorspannung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Berechnungszeit 2,5 mal länger bei vorspannten Zellmodule ist. Zusätzlich wirkt die Vorspannung grundsätzlich auf die lokalen Moden auf die Rahmenblech auf. Die Vorspannung verursacht eine Resonanzfrequenzsteigung bei den Biegemoden des Rahmenblechs. Beim Zellmodul treten bei 13 von 184 berechneten Schwingmoden Frequenzabweichungen grösser als 1% die in Abbildung 20 dargestellt werden

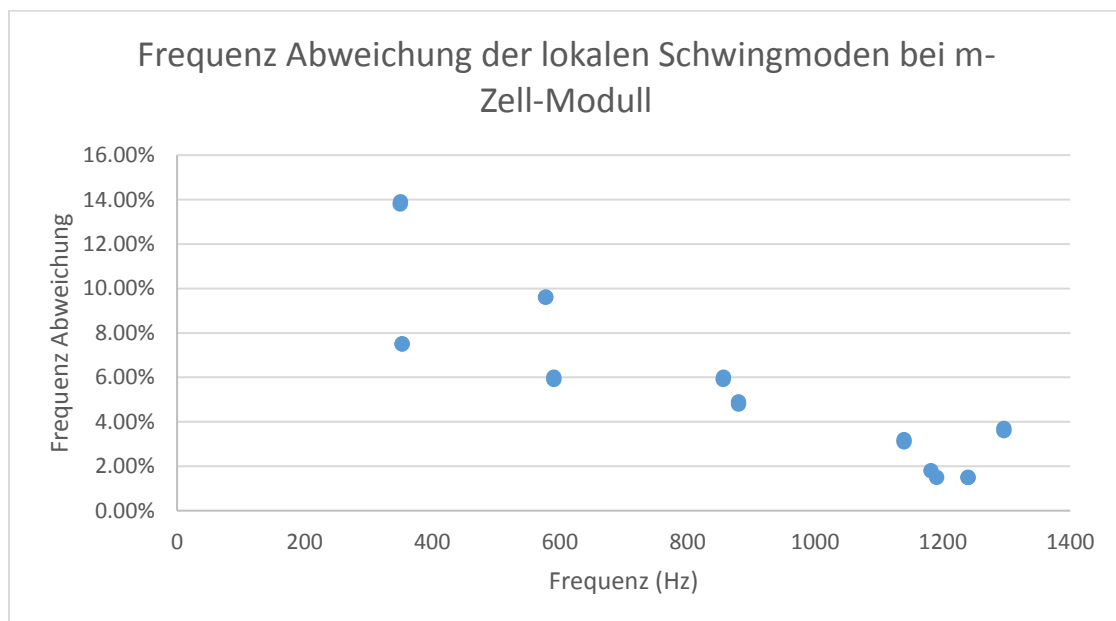


Abbildung 20: Frequenz Abweichung der lokalen Schwingmoden bei m-Zellmodul

---

Die Ergebnisse zeigen, dass die größeren Abweichungen an niedrigen Frequenzen stattfinden und nur bei lokalen Moden auftreten. Da im Rahmen dieser Arbeit nur globale Moden betrachtet werden, wird die Vorspannung der Zellen nicht berücksichtigt.

Ein Beispiel dafür ist die 3. Biegemode des Rahmenblechs, die in Abbildung 21 gezeigt wird. Allerdings sind die Abweichungen von globalen Schwingformen, wie z.B. die erste Biegemode, die in Abbildung 21 rechts gezeigt wird, sehr niedrig (0,06%)

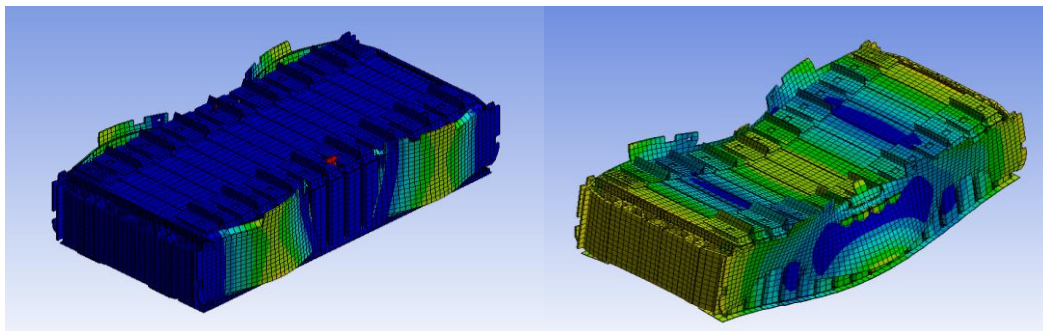


Abbildung 21: Dritte lokale Biegeschwingung des Rahmenblech (links) erste globale Biegeschwingung (rechts)

Beim 8er-Zellmodul werden 249 Schwingmoden im Bereich von 300 Hz bis 2500 Hz ermittelt und beim 16er-Zellmodul 184 Schwingformen im Bereich von 200 bis 1500 Hz. Das bedeutet, dass durchschnittlich jede 9 und 7 Hz eine neue Schwingmode ermittelt wird. Wie bei der Modulrahmen wird die Auswertung der Versuche wahrscheinlich auswendig.

Ein Vergleich zwischen 16er und 8er Zellmodul ermöglicht die Beobachtung des Einflusses der Zellanzahl bei Zellmodule. Die Frequenzen der vier ersten Biegemoden und dessen Abweichung sind in die folgende Tabelle zusammengefasst. Die Ergebnisse weisen eine Senkung der Frequenz der Biegemoden auf, wenn die Zellanzahl steigt.

Tabelle 1: 4 ersten Biegemoden des 8er- und 16er-Zellmodul

Biegemode	8er-Zellmodul Frequenz (Hz)	16er-Zellmodul Frequenz (Hz)	Frequenzabweichung
1	986	619	37.22%
2	1055	842	20.19%
3	1789	999	44.16%
4	1825	1047	42.63%

## 4 Experimentelle Modalanalyse

Um die verschiedenen Modellierungsansätze zu validieren, werden experimentelle Modalanalyse von zwei Zellmodule (8 und 16 Zellen) und einer Modulrahmen durchgeführt. Die in diesem Kapitel beschriebene experimentelle Modalanalyse wird verwendet, um FE-Modelle mit gemessenen Daten zu vergleichen. Bei experimentellen Modalanalysen werden Probekörper angeregt, um deren Schwingungsverhalten zu messen. Die Anregungen können beispielsweise durch einen Impedanz-Hammer oder Shaker erfolgen. In beiden Fällen werden oszillierende Auslenkungen auf die Probekörper übertragen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Probekörper durch einen Shaker angeregt. Die Anregung muss idealerweise parallel zum Eigenvektor des Anregungspunkts eingeleitet werden. Die Strukturantwort wird durch ein Laser-Vibrometer aufgezeichnet.

### 4.1 Versuchsplanung und -durchführung

Für jeden Prüflingen wird eine experimentelle Modalanalyse geplant, durchgeführt und ausgewertet. Bei dem 8er Zellmodul werden 3 Oberflächen (Rahmenplatte, -blech und Zellkontaktiersystem) gemessen, bei dem 16er Zellmodul 5 (die zwei Rahmenplatten, die zwei Rahmenbleche und das Zellkontaktiersystem) und beim Modulrahmen 2 Oberflächen (Rahmenplatte und Rahmenblech). Die während der Messung verwendeten Parameter werden in Tabelle 2 zusammengefasst.

Der Aufbau der experimentellen Modalanalyse für ein 16er Zellmodul wird in Abbildung 22 gezeigt. Zu sehen ist ein Zellmodul ohne Deckel, an der Prüfvorrichtung hängend, Spiegel und der Stinger des Shakers. Zur Verminderung des Einflusses aus der Lagerung auf die Bestimmung

---

der Resonanzfrequenzen wurde jeder Prüfling an Sprungfedern aufgehängt. Der Stringer des Shakers regt auf eine leicht außermittige Position des Wärmeleitblechs an.

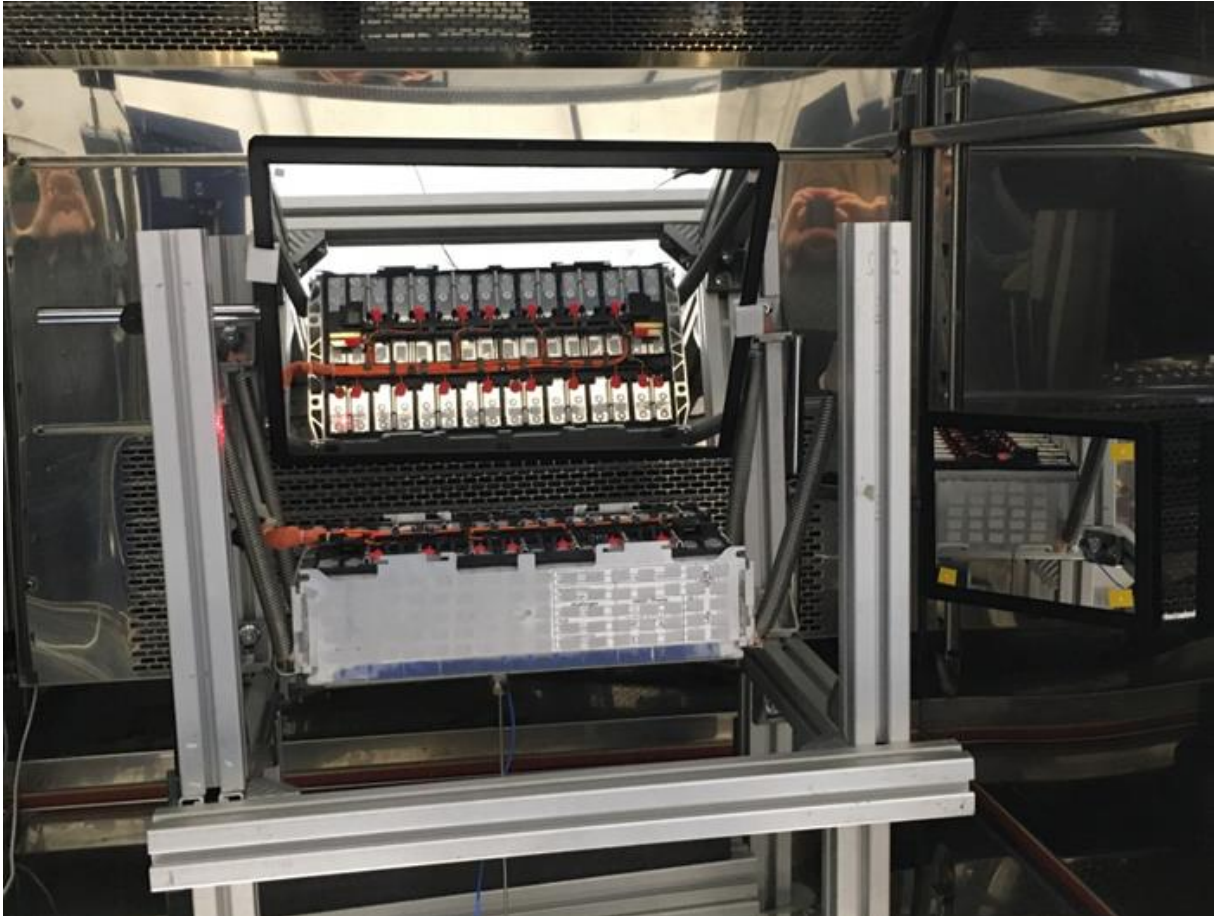


Abbildung 22: Prüfaufbau zur Durchführung eines experimentellen, 16er Zellmoduls

Die Laservibrometer wird gegenüber der Prüfvorrichtung positioniert. Diese Anordnung ermöglicht nur die Messung des Rahmenblechs, da die anderen Flächen in dieser Position verdeckt sind. Um die anderen Seiten ohne die Position des Vibrometers bzw. Prüflings zu verändert zu analysieren, werden Spiegel verwendet. Dabei wird der Laser an einem Spiegel reflektiert und trifft so auf eine weitere Fläche des Zellmoduls, wodurch eine Analyse dieser Fläche möglich wird. Ein Geometrielaser des Laservibrometers erfasst die Abstände von Lasermesskopf zu Spiegeln und die Abstände von Spiegeln zu dem zu vermessenden Objekt und die Koordinaten der Spiegel und speichert die in der Software. Ebenso ist es möglich die vermessenen Flächen des Zellmoduls virtuell zusammenzusetzen. Der Aufbau des 8er-Zellmoduls ist analog. Bei den Versuchen vom Modulrahmen regt allerdings den Stringer auf der Rahmenplatte an, vgl. Abbildung 23.

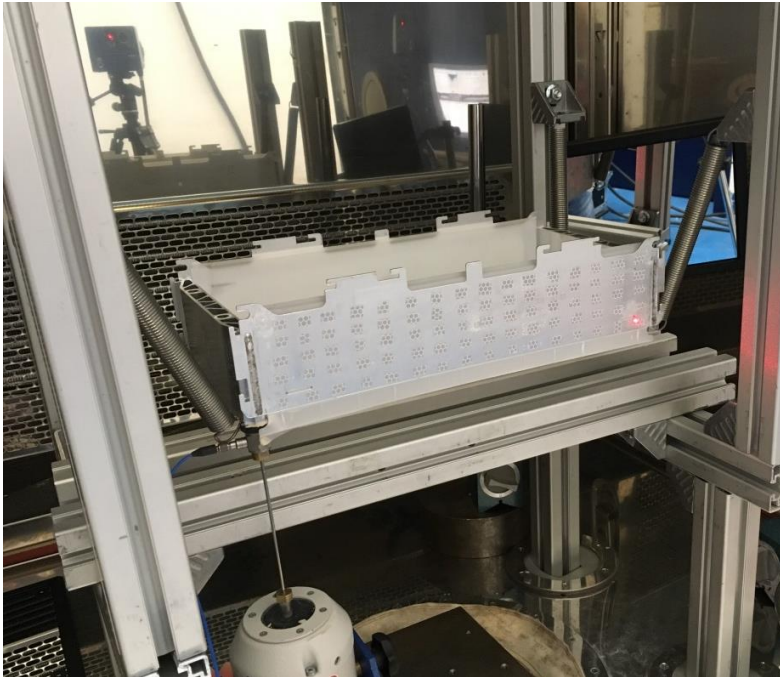


Abbildung 23: Prüfaufbau des Modulrahmens

In Abbildung 24 wird ein virtuelles 8er-Zellmodul, bestehend aus Rahmenblech, Rahmenplatte und ZKS dargestellt. An den Messpunkte, die in Grau repräsentiert sind, wird die Geschwindigkeit des jeweiligen Messpunktes durch die Anregung des Shakers gemessen. Die Summenkurve wird als Summe aller Übertragungsfunktionen aller Messpunkte eines Prüflings definiert und wird im folgenden Abschnitt analysiert.

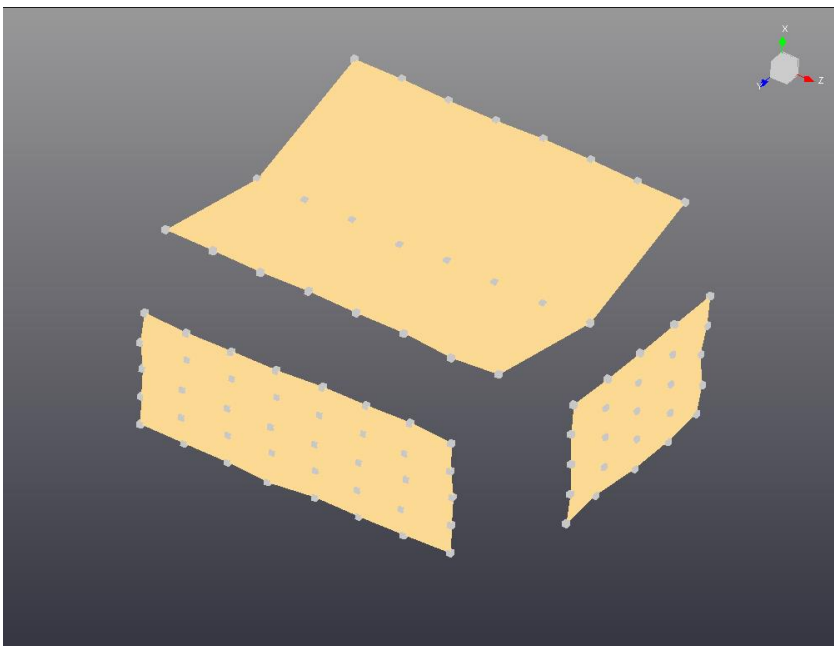


Abbildung 24: Virtuelles Zellmodul bestehend aus Rahmenplatte, -blech und Zellkontaktiersystem

Tabelle 2: Während der Messungen verwendeten Parameter

3D Laservibrometer und Shaker-Anregung			
Messequipment			
Polytec 3D Scanning-Laservibrometer			
TIRA Skater Typ S 50018			
TIRA Verstärker BAA120			
PCB Kraftaufnehmer 208C02			
Messparameter	8er Modul	16er Modul	Modulrahmen
Messbereich – Vibrometer	0,5 mm/s/V	0,5 mm/s/V	0,5 mm/s/V
Anzahl der Scanpunkte	269	774 (-2)	105
Messrichtung	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z
Anregungsrichtung	X	X	X
Frequenzbandbreite	4 000 Hz	4 000 Hz	4 000 Hz
Frequenzauflösung	0,3125 Hz	0,3125 Hz	0,3125 Hz
FFT Linien	12 800	12 800	12 800
Abtastfrequenz	10 240 Hz	10 240 Hz	10 240 Hz
Mittelungen	20	20	10
Fensterung der Anregung	Rechteck	Rechteck	Rechteck
Fensterung der Antwort	Rechteck	Rechteck	Rechteck
Anregungssignal	Burst Chirp	Burst Chirp	Periodic Chirp (frequenzmodulierter Sinus)
Signalamplitude	2 V	2 V	1 V
Startfrequenz	100 Hz	100 Hz	-
Endfrequenz	4 000 Hz	2 000 Hz	-
Burst-Start	1 %	1 %	-
Burst-Länge	90 %	90 %	-

## 4.2 Analyse der experimentell ermittelten Übertragungsfunktion

Bei der Übertragungsfunktion der Zellmoduln bzw. Modulrahmen handelt es sich um die Summe aus den Übertragungsfunktionen aller jeweiliger Messpunkte. Der Übertragungsfrequenzgang stellt das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangspegel in einem bestimmten Frequenzbereich dar. Die Eingangsgröße der Übertragungsfunktion ist die durch den Impedanzmesskopf des Shakers gemessene Kraft der Anregung und die Geschwindigkeit des Messpunkts, die durch das Laservibrometer gemessen wird, ist die Ausgangsgröße. Damit ergibt sich die Einheit (m/s)/N für die Amplitude aufgezeichnet über die Frequenz (Hz).

Bei der Auslenkung mehrerer Messpunkte gleichphasig bzw. gegenphasig wird ihre maximale Auslenkung erreicht. Diese Maxima, die auf der Übertragungsfunktion darstellt werden, weisen



die Resonanzfrequenzen aus. In diesen Frequenzen schwingen die Prüflinge um eine Ruhelage und bildet somit eine stabile Schwingform aus. Aus diesen Grund liegt bei der experimentellen Modalanalyse die Auswertung der Maxima der Übertragungsfunktion im Vordergrund. Abbildung 25 zeigt eine Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 4 kHz des Modulrahmens.

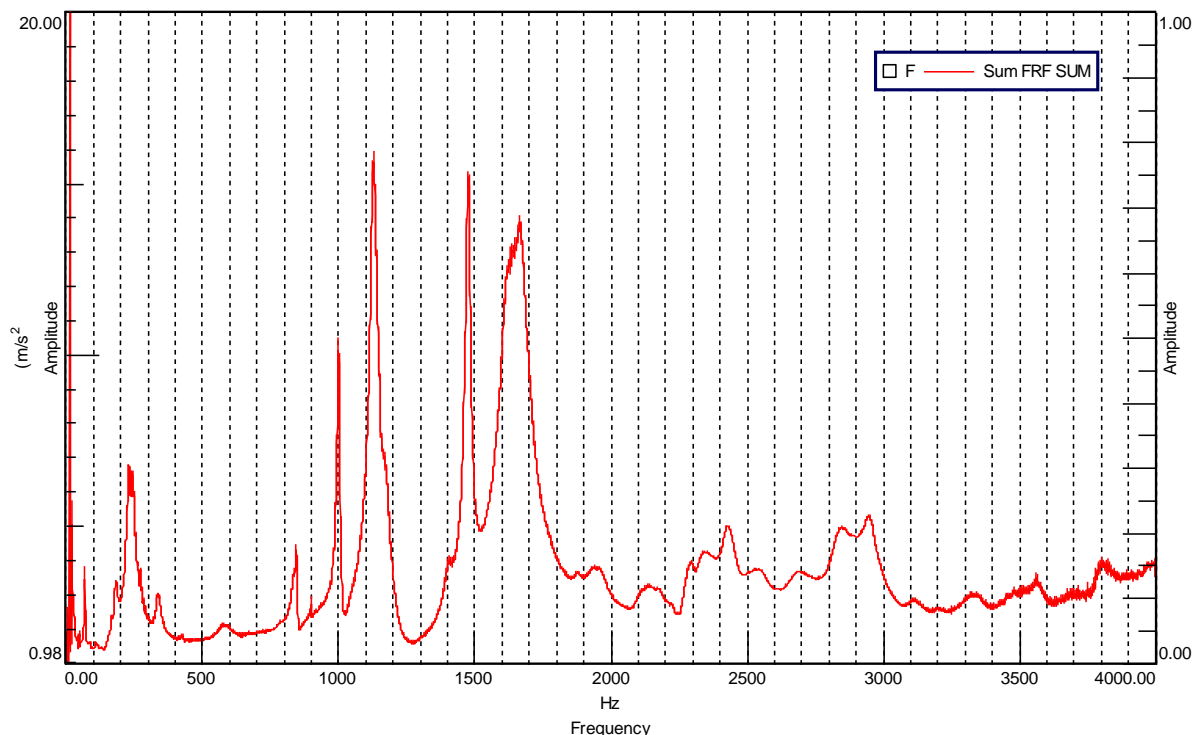


Abbildung 25: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 4 kHz des Modulrahmens

### 4.3 Modenbestimmung

Nach der Ermittlung der jeweiligen Übertragungsfunktionen werden die Ergebnisse ausgewertet, um die Eigenfrequenzen, modale Dämpfungen und Eigenschwingformen zu bestimmen. Der Vorgang ist für jede Prüfling identisch. Durch die Polytec-Software werden die Pole der Übertragungsfunktion berechnet, um anhand der Pole die Resonanzfrequenzen der Struktur zu ermitteln. Bei der Auswertung werden nur Frequenzen ausgewählt, die folgende Kriterien erfüllen:

- Die Summenfunktion weist an der Stelle ein Maximum auf,
- Frequenz und Dämpfung sind stabil, und
- Die Mode Indicator Funktion weist an der Stelle ein Minimum auf.

---

Die Mode Indicator Function (MIF) nutzt das Prinzip, dass eine Antwortfunktion im Resonanzfall, also beim Austreten einer globalen Schwingform, eine 90°-Phasenverschiebung gegenüber einer Anregungsfunktion aufweist. Somit tritt bei einer realen Mode Aufgrund dieser Phasenverschiebung ein Minimum der MIF auf. In Kombination mit den oben genannten Kriterien ist dies ein hinreichender Indikator für eine reale Resonanzfrequenz der Struktur.

In folgenden Unterkapitel werden für jede Prüfling die Auswertung erläutert und dessen modale Parameter zusammengefasst.

---

#### 4.3.1 Auswertung der Modulrahmen

---

Der Modulrahmen ermöglicht eine einfache Einführung in der Auswertungsprozess. Bei diesem Prüfling werden Vorderseite (Rahmenblech) und rechte Seite (Rahmenplatte) gemessen. Auf dem Rahmenblech werden 80 Messpunkte definiert und auf dem Rahmenplatte 25. Ein virtueller Modulrahmen wird in Abbildung 26 dargestellt. Der Summenfrequenzgang, den Abbildung 25 zeigt, besteht aus allen gemessenen Übertragungsfunktionen (beide Seiten des Rahmens in X-,Y- und Z-Richtung). Oberhalb von 60 Hz treten die ersten Biegemoden des Rahmens auf. Unterhalb von 60 Hz ist nur mit Starrkörpermoden zu rechnen, die in der Auswertung vernachlässigt werden. Die modalen Parameter werden in Tabelle 3 zusammengefasst.

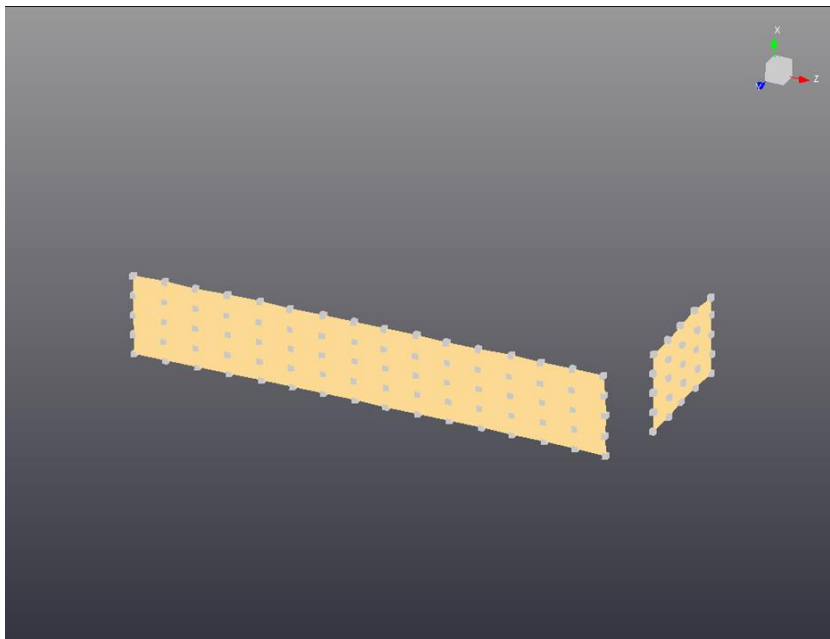


Abbildung 26: Virtueller Modulrahmen bestehend aus Rahmenblech und Rahmenplatte



Tabelle 3: Modalen Parameter Modulrahmen

EMA Mode Nr.	Eigenfrequenz f [Hz]	modale Dämpfung D [%]
1	67,303	0,686
2	89,731	2,401
3	180,391	1,578
4	239,785	4,536
5	340,033	1,484
6	584,907	0,967
7	844,447	0,226
8	895,533	0,424
9	999,106	0,402
10	1127,907	1,006
11	1149,644	0,439
12	1178,371	1,117
13	1407,734	0,650
14	1475,309	0,641
15	1619,976	1,484
16	1657,099	1,508
17	1873,306	0,229
18	1946,405	1,077
19	2114,412	0,254
20	2167,227	0,172
21	2239,599	0,253
22	2289,733	0,556
23	2349,614	1,338
24	2430,452	0,996
25	2535,294	1,197
26	2688,622	0,948
27	2744,855	0,064
28	2830,643	0,525
29	2945,897	0,680
30	2945,927	0,679

---

Um einen Vergleich der identifizierten Eigenformen herzustellen, wird das MAC berechnet. Auf Grundlage der MAC-Werte werden zwei modale Modelle, die entweder differenziert analysiert wurden oder zur Überprüfung der Gültigkeit einer Eigenwertanalyse dienen, miteinander verglichen. Im hier dargestellten Fall werden die Eigenformen aus einer Eigenwertanalyse verglichen. Dabei wird jede Eigenform im modalen Modell (A) mit der Eigenform im Modell (B) gleichgesetzt. Besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden komplexen Eigenvektoren A und B, ergibt sich ein MAC-Wert nahe Einhundert (Rot), andernfalls nahe Null (Dunkelblau).

Viele ermittelte Schwingformen zeigen deutliche Biegeschwingungen von Rahmenblech und Rahmenplatte sowie Torsionsschwingungen des gesamten Prüflings. Vier Beispiele werden in Abbildung 27 dargestellt. Zusätzlich werden andere Schwingformen ermittelt, die nicht unter Biege- oder Torsionsmoden einsortiert werden können. Für das Kalibrierung-Verfahren werden einfache Schwingformen verwendet (Biege- und Torsionsschwingungen).

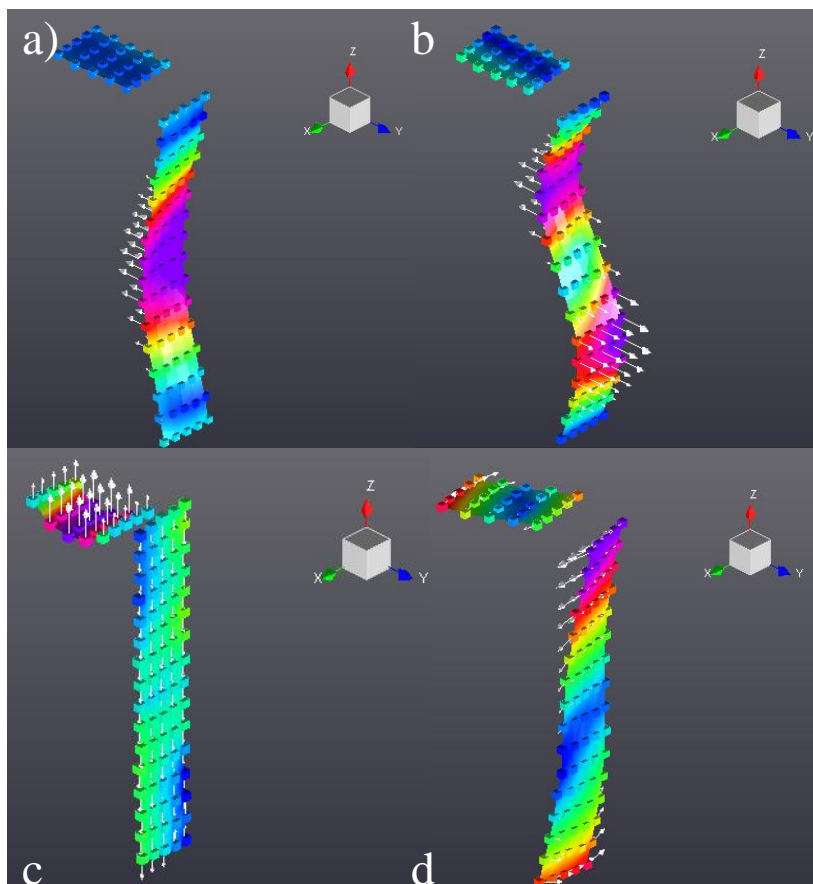


Abbildung 27: a) und b) 1er und 2er Biegeschwingung des Rahmenblechs, c) 1er Biegeschwingung der Rahmenplatte, d) Torsionsschwingung des Prüflings

---

### 4.3.2 Auswertung der 8er-Zellmodul

---

Beim 8er-Zellmodul werden Vorderseite (Rahmenblech), rechter Seite (Rahmenplatte) und Oberseite (Zellkontaktiersystem) gemessen. Auf dem Rahmenblech werden 40 Messpunkte definiert, auf der Rahmenplatte 25 und auf den Zellkontaktiersystem 21. Ein virtueller 8er-Modulrahmen wird in Abbildung 24 dargestellt. Beim 8er-Zellmodul werden zwei Messungen mit zwei verschiedenen Frequenzbereiche durchgeführt. Der erste von 0 Hz bis 1500 Hz und der zweite von 1500 bis 4000 Hz. Die Summenfrequenzgang, die Abbildungen 28 und 29 zeigen, besteht aus allen gemessenen Übertragungsfunktionen (beide Seiten des Rahmens in X-, Y- und Z-Richtung). Oberhalb von 300 Hz treten die ersten Biegemoden des Rahmens auf. Unterhalb von 300 Hz ist nur mit Starrkörpermoden zu rechnen, die in der Auswertung vernachlässigt werden.

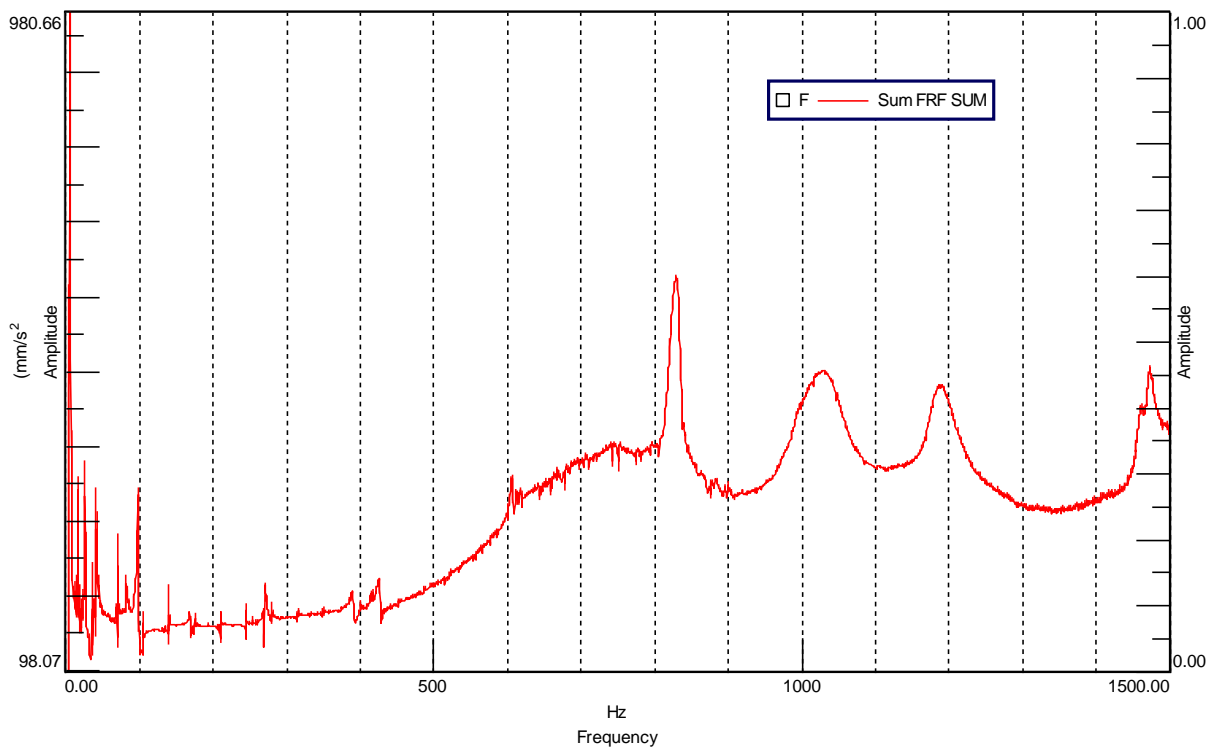


Abbildung 28: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1500 Hz von der 8er-Zellmodul

Oberhalb von 2000 Hz ist die Dämpfung des Systems so hoch, dass Biegemoden kaum zu erfassen sind. Analog zum Summenfrequenzgang lässt sich aus der MAC Analyse (Abbildung 31) ableiten, dass die identifizierten Moden basierend auf einer hohen Dämpfung und Modendichte nicht hinreichend genau identifiziert werden können. Aus diesem Grund wird der Frequenzbereich bis zu 2000 Hz ausgewertet. Die modalen Parameter werden in Tabelle 4 zusammengefasst.

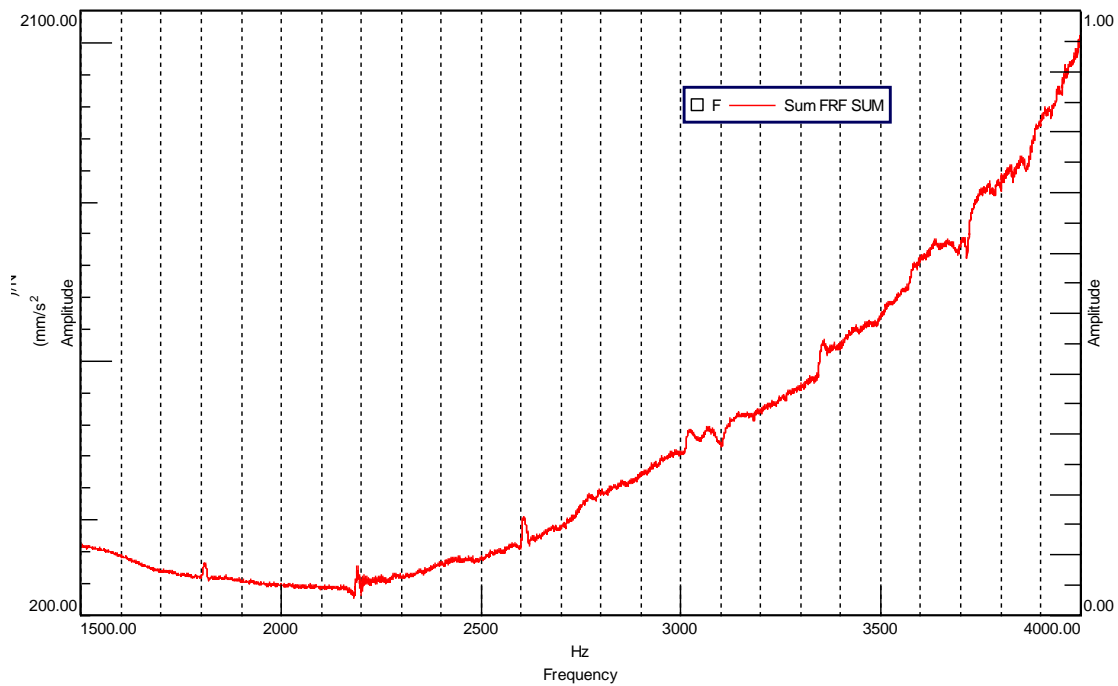


Abbildung 29: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4000 Hz von der 8er-Zellmdoul

Tabelle 4: Modalparameter 8er-Zellmodul

EMA Mode Nr.	Eigenfrequenz f [Hz]	modale Dämpfung D [%]
1	35,313	0,120
2	40,525	0,433
3	97,958	0,618
4	169,336	0,269
5	269,574	0,177
6	389,873	0,125
7	606,165	0,617
8	636,086	7,087
9	774,230	5,154
10	833,784	0,805
11	882,090	0,040
12	1031,725	3,905
13	1137,591	0,254
14	1192,645	2,403
15	1470,130	0,240
16	1535,783	6,625
17	1803,983	0,038

Bei der Auswertung wird sowohl beim 8er, als auch beim 16er Modul festgestellt, dass die Zellen in der Batterie ein Verhalten aufweisen, wo sie gegeneinander schwingen. Aus diesem Grund würde mehrere Auswertungen vorgeschlagen, wobei zunächst eine Auswertung komplett mit Oberseite (ZKS) und eine nur des Rahmens (Rahmenplatte und Rahmenblech) durchgeführt werden. Hierbei stellen sich die lokalen Moden deutlicher raus.

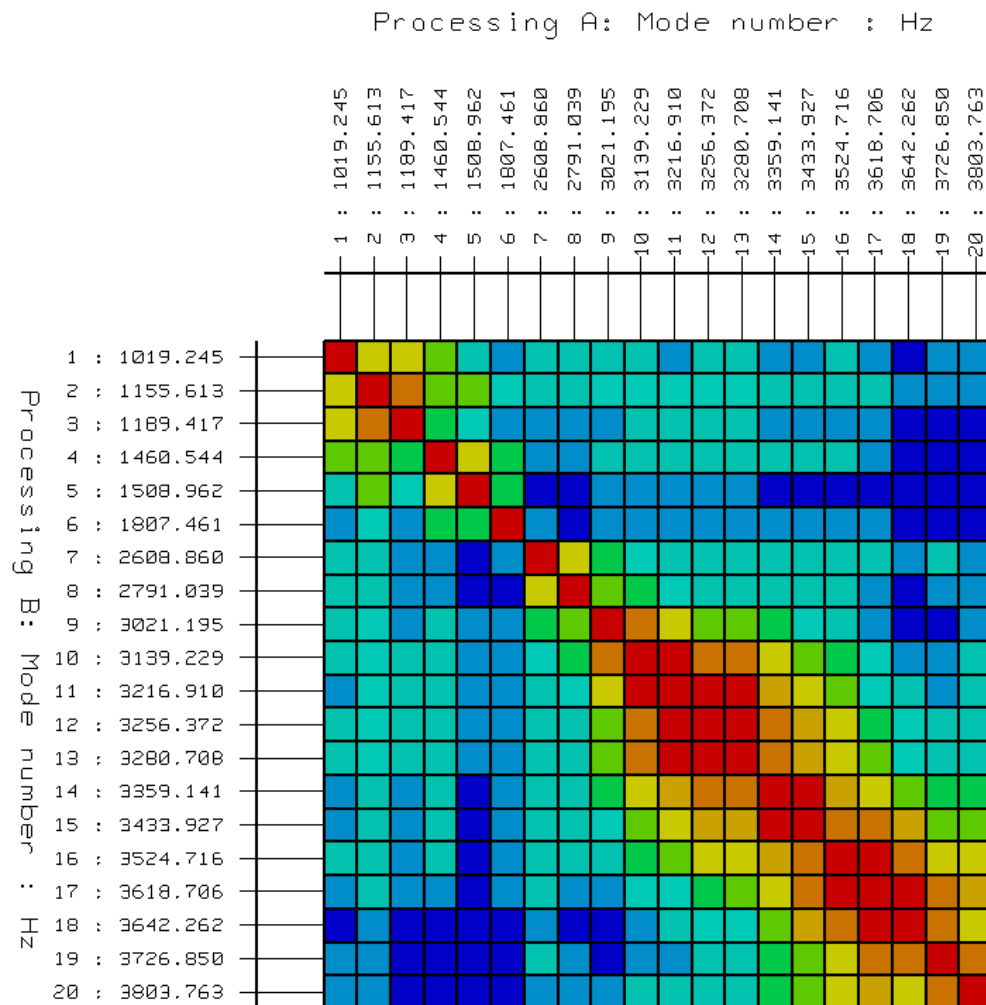


Abbildung 30: MAC – Vergleich Modulrahmen

Nachteile von diese zweite Auswertung ist, dass die Identifizierung von bestimmten Biegemoden sehr kompliziert ist, deswegen werden die zwei Auswertungen berücksichtigen. Nach die Auswertung werden zwei Biegeschwingung und eine Torsionsschwingung ermittelt, die in der Kalibrierung verwendet werden, vgl. Abbildung 31. Die anderen Schwingformen werden später auch betrachtet, um die Verbesserung des Modells zu bestätigen.

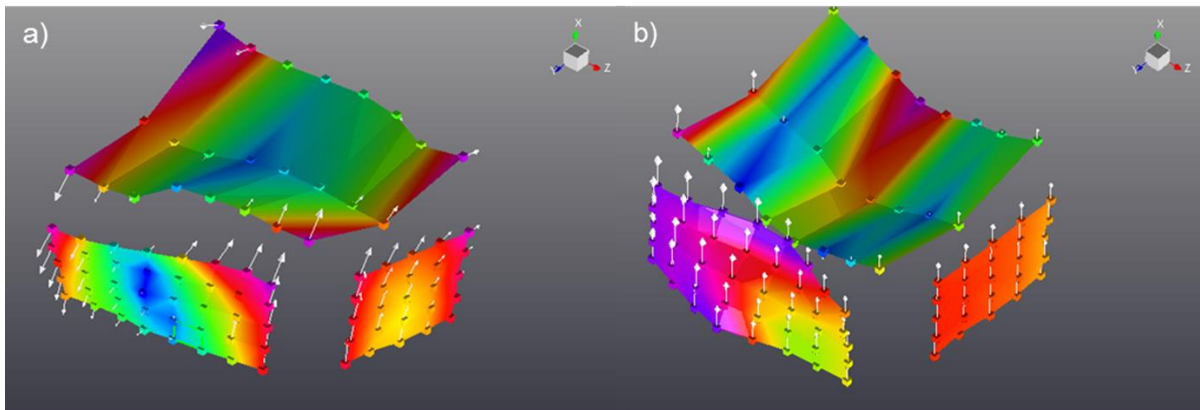


Abbildung 31: a) Torsionsmode des 8er-Zellmoduls, b) 1er Biegeschwingung des 8er-Zellmoduls

#### 4.3.3 Auswertung der 16er-Zellmodul

Beim 16er-Zellmodul werden Vorderseiten (Rahmenblech), rechter Seite (Rahmenplatte) und Oberseite (Zellkontaktiersystem) gemessen. Auf jede s Rahmenblech werden 80 Messpunkte definiert, auf jeder Rahmenplatte 25 und auf den ZKS 48. Ein virtueller 16er-Modulrahmen wird in Abbildung 32 dargestellt. Beim 8er-Zellmodul werden zwei Messungen mit zwei verschiedenen Frequenzbereiche durchgeführt. Die erste von 0 Hz bis 1500 Hz und die zwei von 1500 bis 4100hz. Die Summenfrequenzgang, die Abbildungen 33 und 34 zeigen, besteht aus allen gemessenen Übertragungsfunktionen (beide Seiten des Rahmens in X-,Y- und Z-Richtung) . Oberhalb von 200 Hz treten die ersten Biegemoden des Rahmens auf. Unterhalb von 200 Hz ist nur mit Starrkörpermoden zu rechnen, die in der Auswertung vernachlässigt werden.

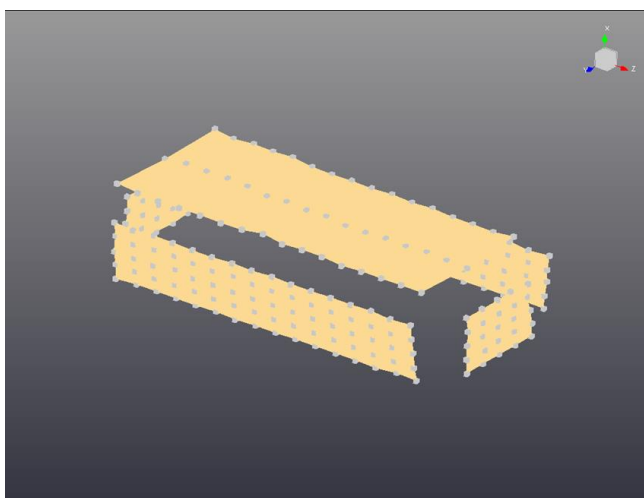


Abbildung 32: Virtueller 16er-Modul bestehend aus Rahmenblechs, Rahmenplatten und Zellkontaktiersystem

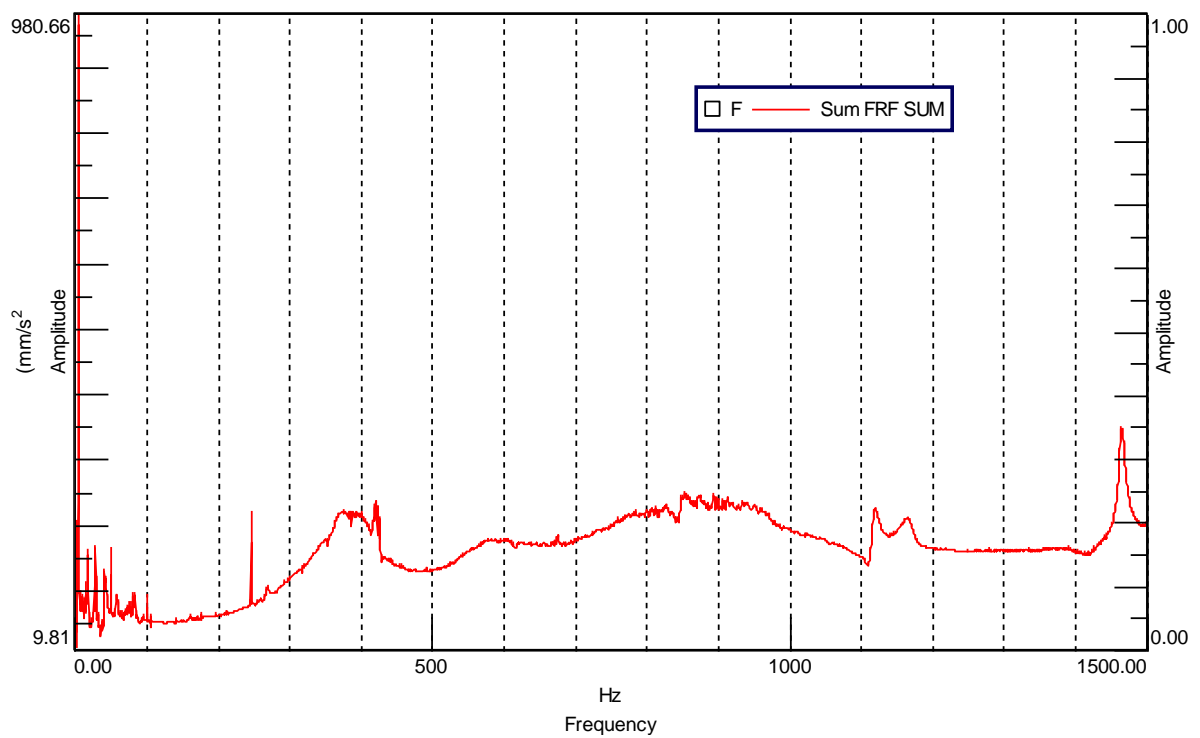


Abbildung 33: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1500 Hz von der 16er-Zellmdoul

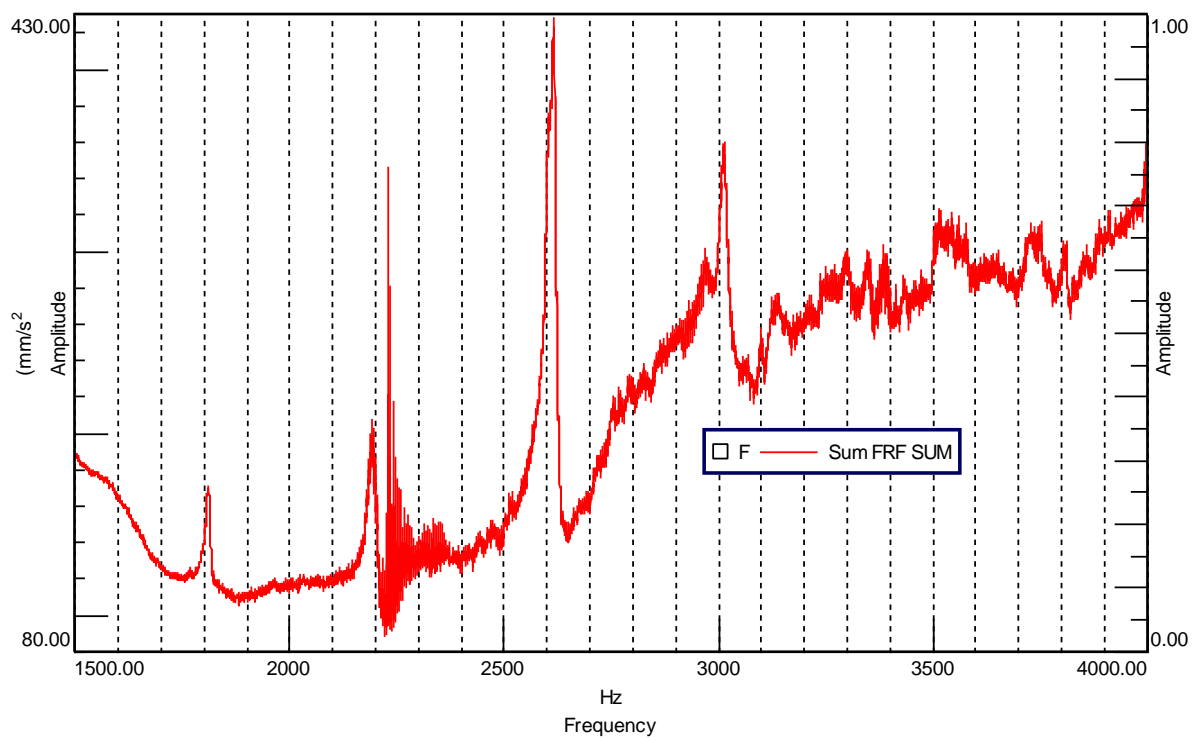


Abbildung 34: Übertragungskurve im Frequenzbereich von 1500 Hz bis 4000 Hz von der 16er-Zellmdoul

Wie beim 8er-Modul ist oberhalb von 2000 Hz die Dämpfung des Systems so hoch, dass Biegemoden kaum zu erfassen sind. Aus diesem Grund wird der Frequenzbereich bis zu 2000 Hz ausgewertet. Die ermittelten modalen Parameter werden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Modalparameter 8er-Zellmodul

EMA Mode Nr.	Eigenfrequenz $f$ [Hz]	modale Dämpfung $D$ [%]
1	299,137	2,333
2	381,609	6,740
3	578,941	4,749
4	787,617	3,552
5	917,566	3,024
6	1008,82	1,269
7	1124,009	0,438
8	1166,967	0,259
9	1462,163	0,072
10	1468,229	0,183
11	1568,024	1,914
12	1810,529	0,084

Wie beim 8er-Zellmodul treten die Zellen lokalen Schwingungen, die eine zweite Auswertung ohne ZKS fordert. Hierbei stellen sich die lokalen Moden deutlicher raus. Allerdings trifft dieser Prüfling viele Biegemoden die auf dieser zweiten Auswertung nicht erkennbar sind. Auf Grund dessen wird nur in diesem Fall die erste Auswertung berücksichtigt. Die vier erste Biegemoden der 16er-Zellmoduls wird in Abbildung 35 dargestellt.

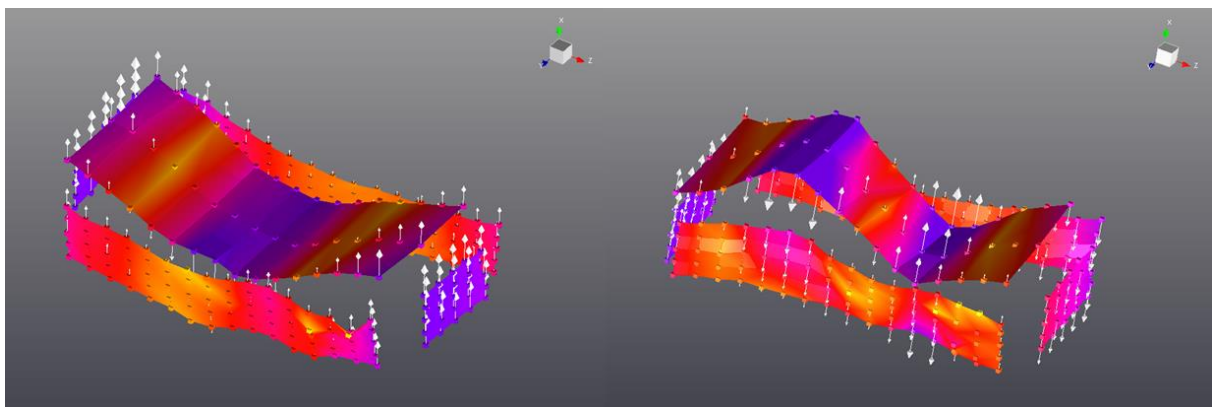


Abbildung 35: Erste und zweite Biegemode des 18er-Zellmoduls



---

## 5 Model-Updating

---

Leistungsfähige iterative Techniken, die der Ingenieur einen besseren Ausblick und Kontrolle über Updating-Verfahren geben, werden entwickelt. Die Verwendung von diesen Methoden bei großen und komplexen FE-Modellen ist durch viele Faktoren begrenzt. Die Parameterkandidaten im Kalibrierungsprozess sollten physische Eigenschaften des FE-Modells sein. Komplexe Strukturmodelle enthalten viele Vereinfachungen. Diese Vereinfachungen ergeben Fehlerquellen, die nicht identifizierbar sind. Die gemessenen modalen Parameter können durch verschiedene Parameterkombinationen ermittelt werden. Allerdings finden die größeren Veränderungen weitgehend auf die sensitiven Parameter und nicht auf die Fehlerquellen statt. Aufgrund dessen hängt der Erfolg des Updating-Verfahrens stark von den ausgewählten Updating-Parametern ab.

Die Kalibrierung des numerischen Modells des Zellmoduls basiert auf den Ergebnissen der experimentellen Modalanalyse und besteht aus zwei Schritten: eine Sensibilitätsanalyse und eine Optimierungsprozess. Auf den verwendeten Vorgang, um die experimentellen und numerischen Ergebnisse zu vergleichen, wird auch in diesem Kapitel eingegangen.

---

### 5.1 Abgleich den Schwingmoden

---

In diesem Abschnitt wird der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Vorgang erläutert, um experimentelle mit numerische Schwingmoden zu vergleichen. Eine richtige Abgleich ist wichtig, um eine korrekte Sensitivitätsanalyse zu gewährleisten. Allerdings ist die Bestimmung eines Abgleichungskriteriums auf Grund der begrenzten Anzahl von Messpunkten keine triviale Tätigkeit. Darüber hinaus können Änderungen auf die Parameter die Reihenfolge von Schwingmoden austauschen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Modal Assurance Criterion (MAC) verwendet, das im Abschnitt 2.5.1 erläutert wird. Die MAC-Werte, die numerische und experimentelle Schwingmoden korrelieren, werden in einer Matrix zusammengefasst. Die Matrizen bestehen aus einer Anzahl  $i$  Spalten und  $j$  Zeilen. Die Anzahl der ermittelten experimentellen Schwingmoden bestimmen die Anzahl  $i$  und die Anzahl der berechneten numerischen Schwingmoden die Anzahl  $j$ . Der höchste Eintrag jeder Spalte kennzeichnet die ähnlichsten Schwingmoden. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Messpunkten gibt manchmal in jeder Spalte Einträge die kleine Abweichungen (-10%) zum am höchsten Wert aufweisen. In diesem

---

Fall werden die Frequenzabweichungen zwischen der numerischen Frequenz  $F_{sim}$  und der experimentellen Frequenz  $F_{exp}$  auch berücksichtigt. Dazu wird eine neue Variable  $h$  definiert, die sowohl die MAC-Wert als auch die Frequenzabweichung bewertet, vgl. Gleichung 50.

$$h = (1 - MAC) + \left| \frac{F_{sim} - F_{exp}}{F_{exp}} \right| \quad (50)$$

Wenn zwei Schwingformen gleich sind sollte der berechnete MAC-Wert 1 sein. Allerdings ist das Erreichen dieses Werts nur theoretisch möglich, da verschiedenen Faktoren die Berechnung beeinflussen. Grundsätzlich geben 3 verschiedene Fehlerquellen: die Messung, das Modell und das Abgleichprozess.

Während der Versuche werden die Koordinaten der Messpunkte gespeichert. Als Voraussetzung für eine richtige Ermittlung des MAC-Werts wird gefordert, dass das verwendete Koordinatensystem das gleiche bei den Versuchen und beim numerischen Modell ist. Dafür werden drei senkrechte Ebene auf dem Zellmodul ausgewählt, durch die die drei Raumrichtungen definieren werden. Das verwendete Koordinatensystem wird in Abbildung 36 gezeigt. Als Referenzflächen werden Rahmenblech, Rahmenplatte und Bodenblech festgelegt. Da bei den Versuchen die Prüflinge an Sprungfeder aufgehängt sind, wird eine kleine Abgleichung zwischen den Koordinatensystemen verursacht.

Bei der Auswertung der Versuche im Kapitel 4.2 wird beobachtet, dass beidem Zellen lokale Schwingungen auftreten, die nicht durch die Simulation modellierbar sind. Diese lokalen Moden beeinflussen die Richtung der Eigenvektoren bzw. die MAC-Werte signifikant. Um diese Störung zu vermeiden, wird eine Auswertung ohne Zellkontaktiersystem durchgeführt, durch die der Einfluss der lokalen Moden deutlich gesenkt wird. Diese Auswertung verbessert die Ergebnisse beim 8er-Zellmodul aber verschlechtert die MAC-Werte des 16er-Zellmodul. Die gemessenen Schwingmoden des 16er-Zellmodul sind Biegemoden, die ohne Zellkontaktiersystem nicht identifizierbar sind. Aus diesem Grund werden bei dem 16er-Zellmodul alle gemessenen Flächen betrachtet. Allerdings werden bei dem 8er-Zellmodul nur die Messungen auf Rahmenblech und Rahmenplatte berücksichtigt. Zusätzlich weisen die Zellmodule eine starke Dämpfung auf, wobei die Ermittlung von deutlichen Schwingformen verhindert.

---

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Vereinfachungen bei der Aufbau des Modelle gesetzt, die Abweichungen beim Abgleich von den Schwingmoden verursachen, wie z.B. die Nutzung von Shell-Elementen oder die Modellierung von der Schweißnähe. Zusätzlich fordert die Berechnung mittels FEM eine Diskretisierung der Bauteile. Ebenso ist das reelle Verhalten von verschiedenen Materialien nicht linear.

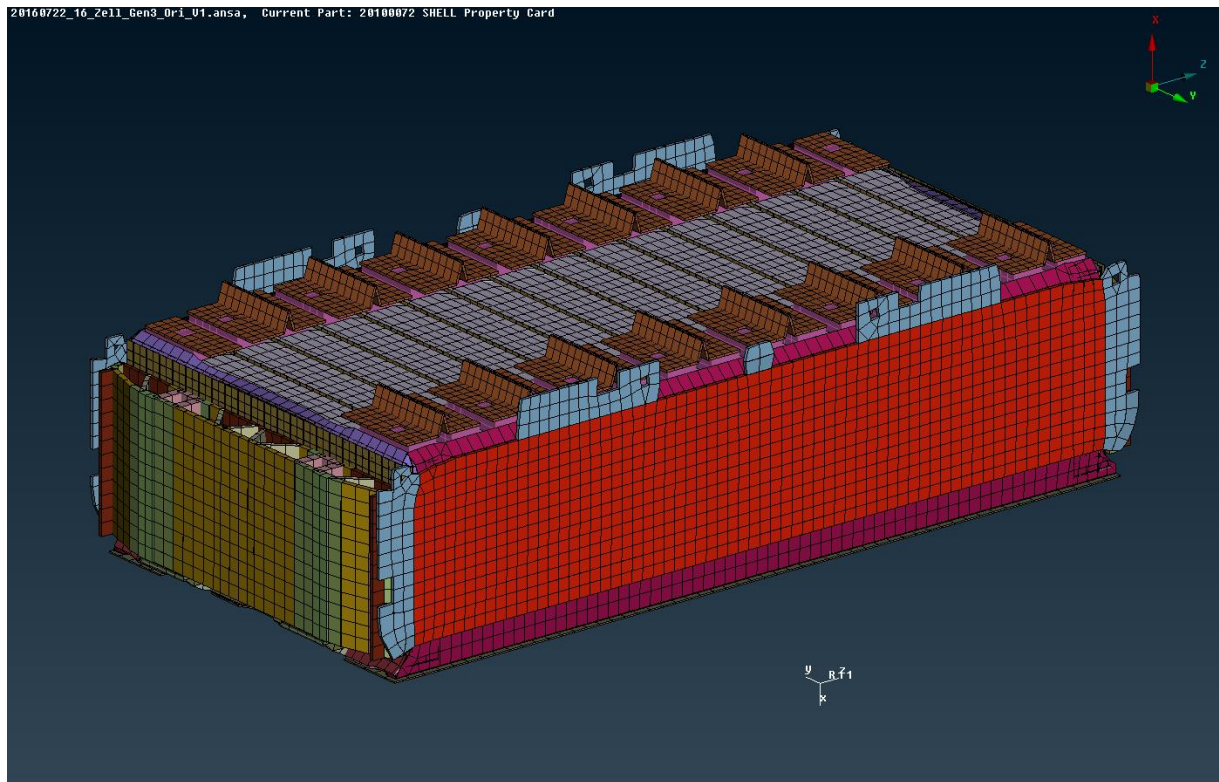


Abbildung 36: Verwendetes Koordinatensystem

Beim Abgleichprozess müssen die Messpunkte mit FE-Knoten kongruent sein. Dazu wird eine Toleranz gesetzt, um den Knoten, der am nächsten liegt, zu ermittelt. Mit diesen ermittelten Knoten werden die numerischen Eigenvektoren berechnet. Diese Positions-Abweichung verursacht eine zusätzliche Ungenauigkeit bei der Berechnung des MAC-Werts.

Aufgrund der beschriebenen Fehlerquellen werden Werte über 0,65 als deutlich korrelierte MAC-Werte definiert, die bei der Optimierung benutzbar sind. Wenn die Werte zwischen 0,3 und 0,65 liegen, können diese auch verwendet werden, aber eine visuelle Abstimmung ist notwendig. (Friswell und Mottershead 1995)

Tabelle 6 enthält die für die Optimierung verwendeten Schwingmoden. MAC-Werte unter 0,65 (mit Stern gekennzeichnet) werden visuell ausgewertet. Die numerischen und experimentellen Schwingformen werden in Abbildungen 37, 38 und 39 dargestellt.

Tabelle 6: Abgleich Messungen mit numerische Ausgangdaten

	Mode Nummer	FEM- Frequenz (Hz)	Versuch- Frequenz (Hz)	Differenz (Hz)	Differenz (%)	MAC
<b>Rahmen</b>	1	72,69	67,37	5,32	7,90	0,749
	2	163,89	179,55	-15,66	-8,72	0,642*
	3	1004,19	997,31	6,88	0,69	0,832
	4	1322,14	1127,53	194,61	17,26	0,812
<b>8er Zellmodul</b>	1- Biegemode 1. Ordnung	1140,16	955,79	184,37	19,29	0,840
	2- Torsionsmode 1. Ordnung	994,03	606,04	387,99	64,02	0,629*
<b>16er Zellmodul</b>	1- Biegemode 1. Ordnung	528,65	380,02	148,63	39,11	0,793
	2- Biegemode 2. Ordnung	805,33	574,62	230,71	40,15	0,382*

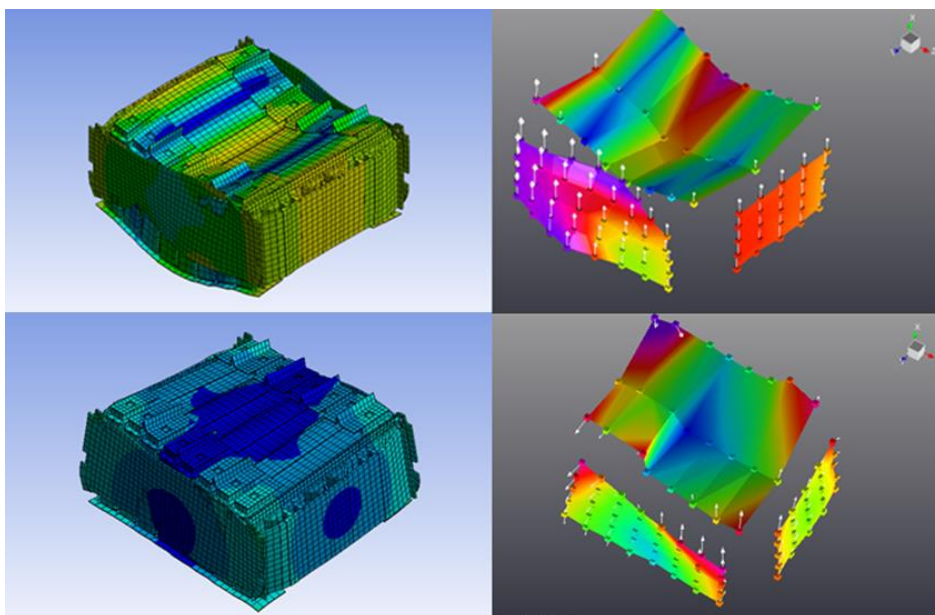


Abbildung 37: Numerische und experimentelle Schwingformen des 8er-Zellmodull (1- Biegemode 1. Ordnung, 2- Torsionsmode 1 Ordnung)

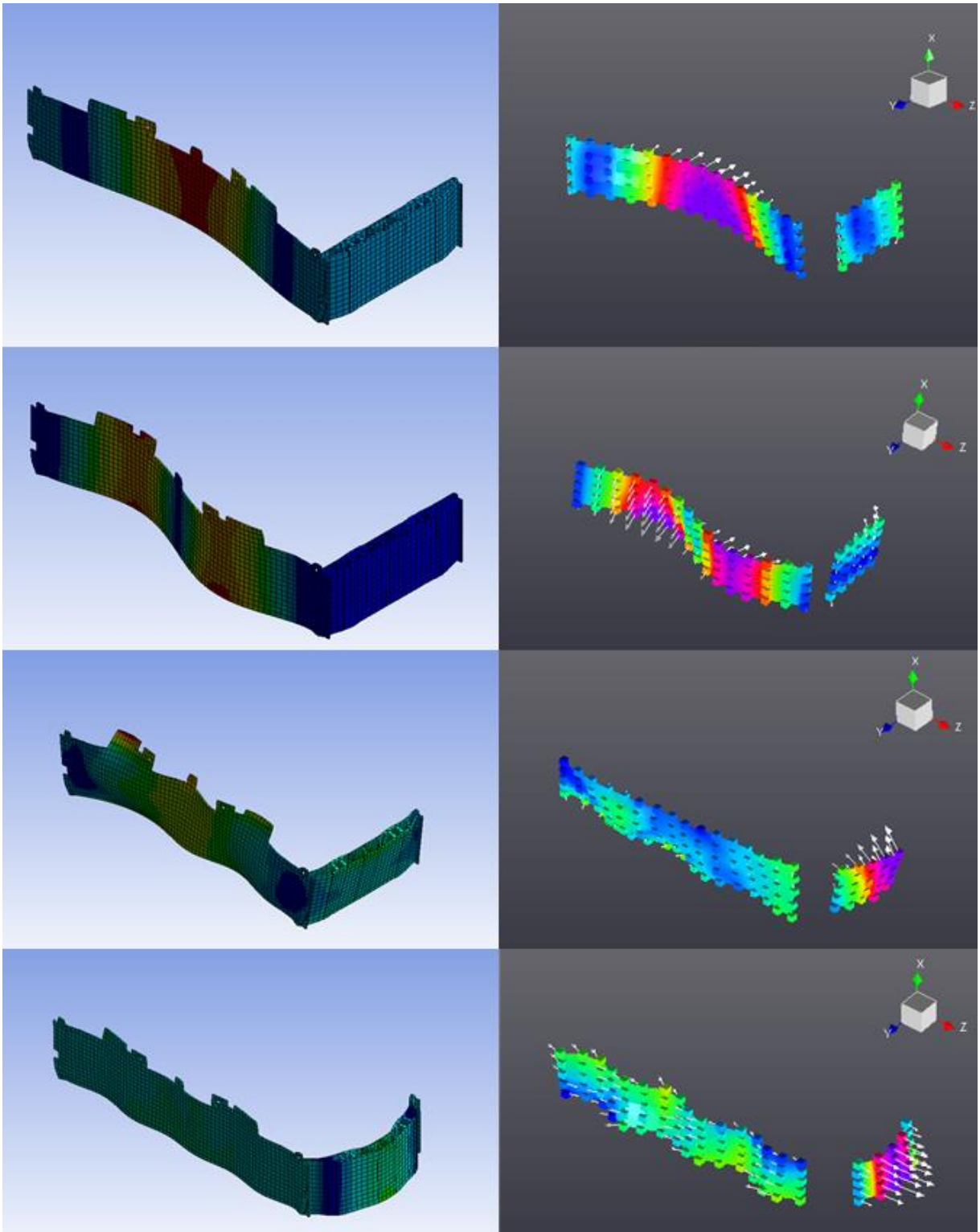


Abbildung 38: Numerische und experimentelle Schwingformen des Modulrahmens



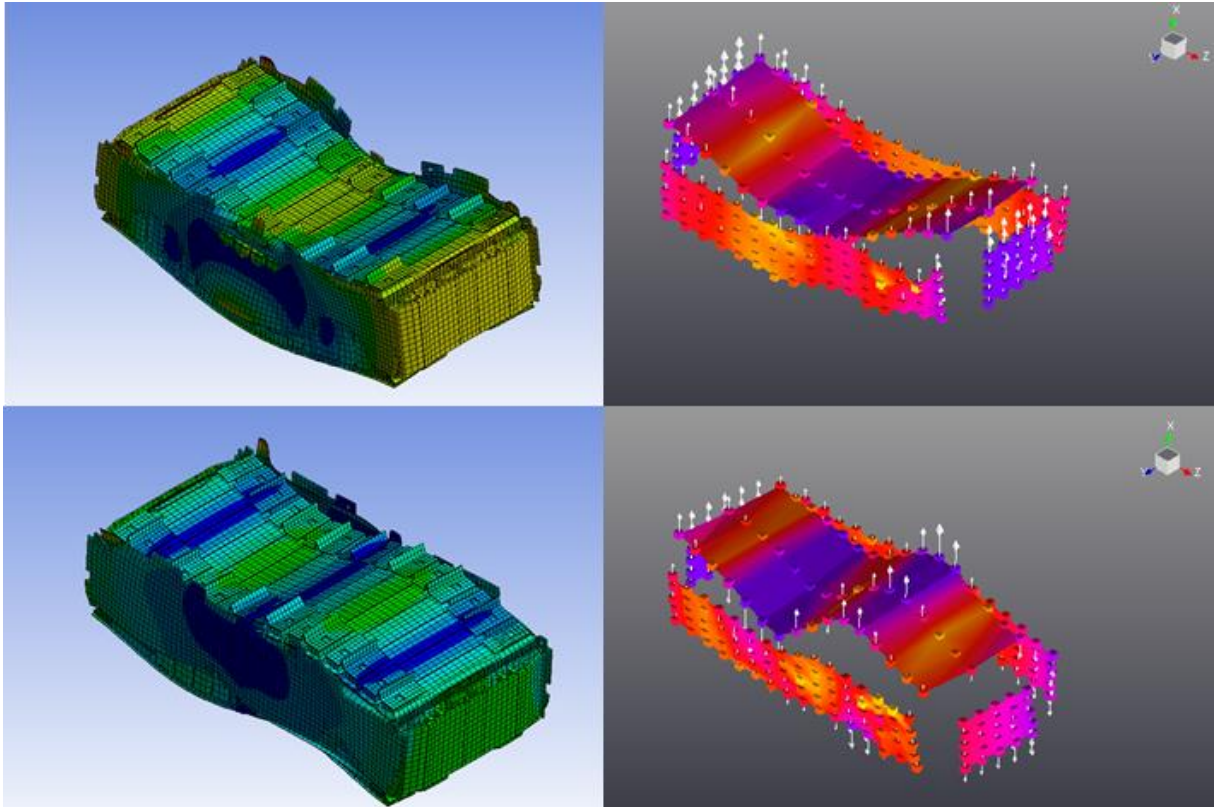


Abbildung 39: Numerische und experimentelle Schwingformen des 16er-Zellmodul (1- Biegemode 1. Ordnung, 2- Biegemode 2. Ordnung)

## 5.2 Sensibilitätsanalyse

Die Sensibilitätsanalyse ermöglicht die Identifikation der Parameter, mit großem Einfluss auf die Frequenzen und Schwingformen und deshalb in der Optimierungsphase verwendet werden. Der Auswahl des Parameters ist ein entscheidender Schritt für eine richtige Modell-Kalibrierung. Die gemessenen Daten enthalten eine begrenzte Informationsmenge, um Probleme von Fehlkonditionierung zu vermeiden, sollte die Anzahl der variierten Parameter klein gehalten werden. Infolgedessen wird für jedes Modell eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt.

Der Modulrahmen besteht aus zwei verschiedenen Materialien: Aluminium und Polypropylen (PP). Als Parameter für die Sensibilitätsanalyse werden Elastizitätsmodul und Dichte beider Werkstoffe variiert. Abbildung 40 zeigt die Korrelationsmatrix der Parameter und Ergebnisse des numerischen Modells. Ein grüner Hintergrund kennzeichnet einen niedrigen Einfluss der Materialeigenschaften auf die modalen Parameter. Wenn eine ganze Spalte grün ist, wie z.B.

bei der Elastizitätsmodul des Polypropylen, bedeutet dies, dass diese Parameter keine Korrelation den Ergebnissen hat und wird nicht beim Kalibrierungsverfahren betrachtet.

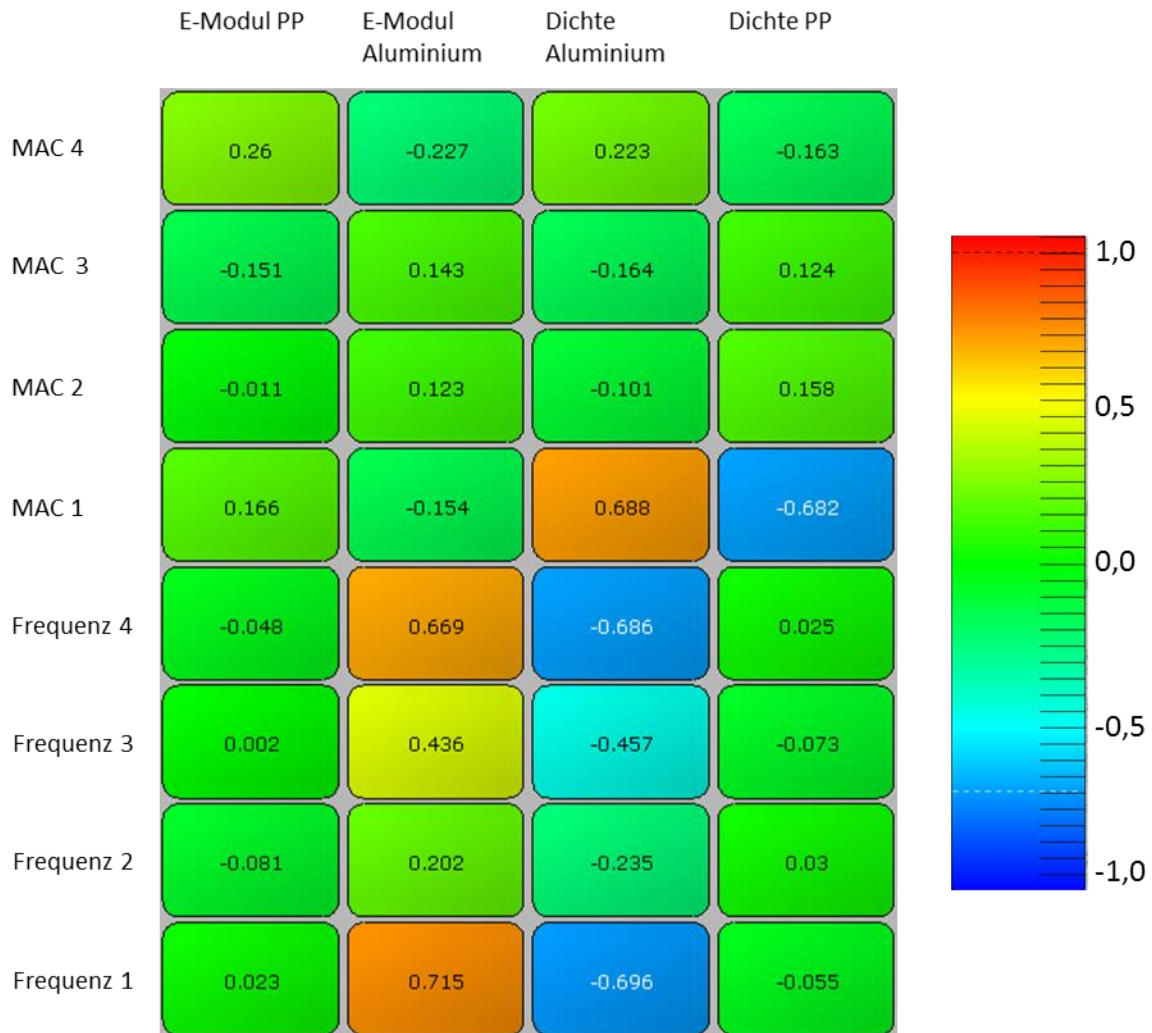


Abbildung 40: Korrelationsmatrix zwischen Parametern und Ergebnissen des numerischen Modells (Rahmen)

Es ist fest zu stellen, dass die Materialeigenschaften eine niedrige Korrelation zu den MAC-Werten aufweisen. Nur MAC 1, vgl. Tabelle 6, korreliert mit der Dichte von der Materialien. Es wird auch gezeigt, dass die zweite Frequenz keine Korrelation zu den Parameter hat. Um dem Einfluss der Parameter zu bewerten, werden 4 verschiedene Antwortoberflächen in 3D ermittelt, die in Abbildung 41 dargestellt werden.

Die erste Grafik (Abb. 40a) stellt den Einfluss der Materialdichten auf die erste Schwingform. Die Ergebnisse zeigen eine Differenz zwischen den maximalen und minimalen Wert von 0,0012. Obwohl die Dichten zu den MAC-1 korreliert sind, ist dessen Einfluss vernachlässigbar. Da die

PP-Dichte nur zum MAC-1 korreliert, wird dieser Parameter während des Optimierungsverfahren nicht berücksichtigt.

Andererseits wird beobachtet, dass die Frequenzabweichungen, außer Frequenz 2, mit den Materialeigenschaften des Aluminiums korrelieren. Die Frequenzen 1 und 4 weisen die gleiche Tendenz auf, vgl. Abb. 40 b und d. Beide Abweichungen sinken bei einer Erhöhung der Dichte und einer Senkung des Elastizitätsmoduls. Ebenso sind die Senkungen deutlich von den Materialeigenschaften beeinflusst. Die Frequenzabweichungen variieren in diesem Fall von 0 bis 20 % und von 10 bis 35% bei Frequenzen 1 und 4.

Die Abweichung der dritten Frequenz treten allerdings Abweichungen von 0% bis 12% auf (Abb. 40c). Der Einfluss auf Frequenzen 1 und 4 ist stärker als auf 3. Im Optimierungsverfahren des Rahmens werden sowohl die Dichte als auch die Elastizitätsmoduln des Aluminiums als Parameter berücksichtigen. Da diese Parameter keine reale unbekannte Größe sind, liegt die Ursprung der Frequenzabweichung vermutlich auf Modellierung der Rahmenblech und -platte bzw. auf den Aufbau des Mesh.

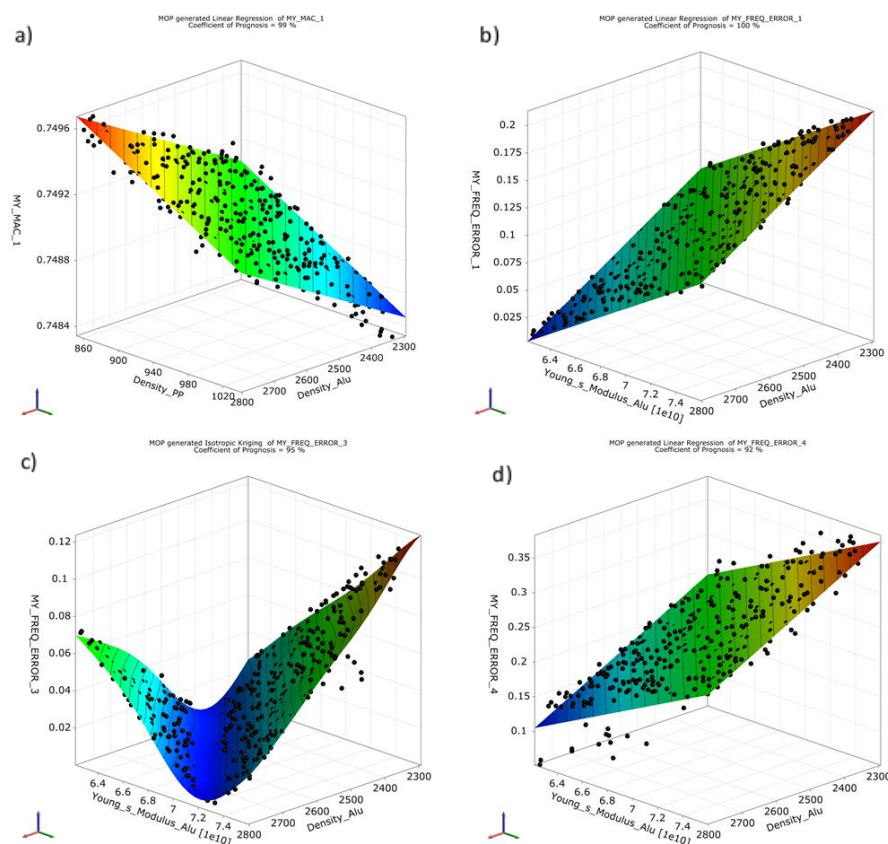


Abbildung 41: Antwortoberflächen von verschiedenen modalen Parameter



Wie schon im Abschnitt 3.1 erläutert, ist die Genauigkeit des berechneten Elastizitätsmoduls in Out-of-Plain-Richtung des Aktivmaterials unbekannt. Ebenso ist die Klebefolie zwischen den Zellen bei der Modellierung sehr stark abstrahiert. Zusätzlich wird in Abschnitt 5.1 gezeigt, dass die Abweichungen zwischen numerischen und experimentelle Frequenzen bei 8er- und 16er-Zellmodul sehr hoch sind. Aufgrund dessen wird eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt, in der sowohl der Elastizitätsmoduls in Out-of-Plain-Richtung als auch das Elastizitätsmodul der Klebefolie eine hohe Schwankung aufweisen. Abbildung 42 zeigt die Korrelationsmatrix zwischen den Parametern und den Ergebnissen des numerischen Modells. Der Elastizitätsmodul der Klebefolie zeigt eine niedrige Korrelation für die verwendete Parameterkonfiguration. Andererseits korreliert das System mit dem Elastizitätsmodul des Aktivmaterials in Out-of-Plain-Richtung. Der Einfluss wird durch Abbildung 43 analysiert.

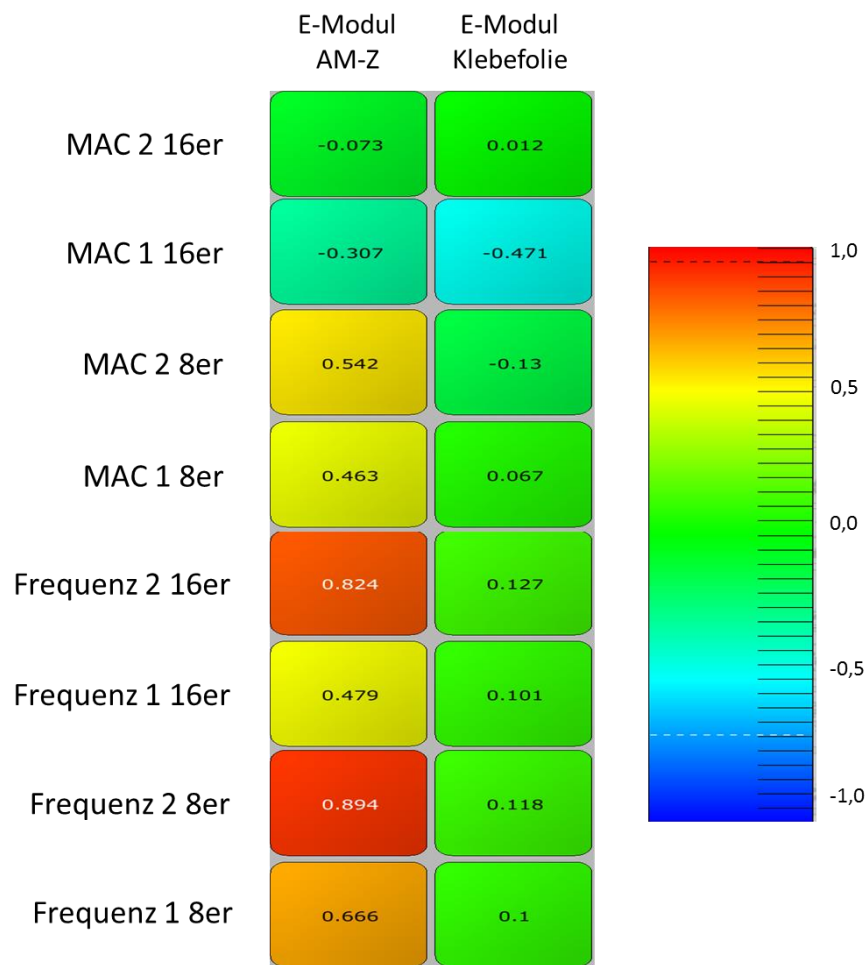


Abbildung 42: Korrelationsmatrix zwischen den Parametern und den Ergebnissen des numerischen Modells (8er und 16er Modul)

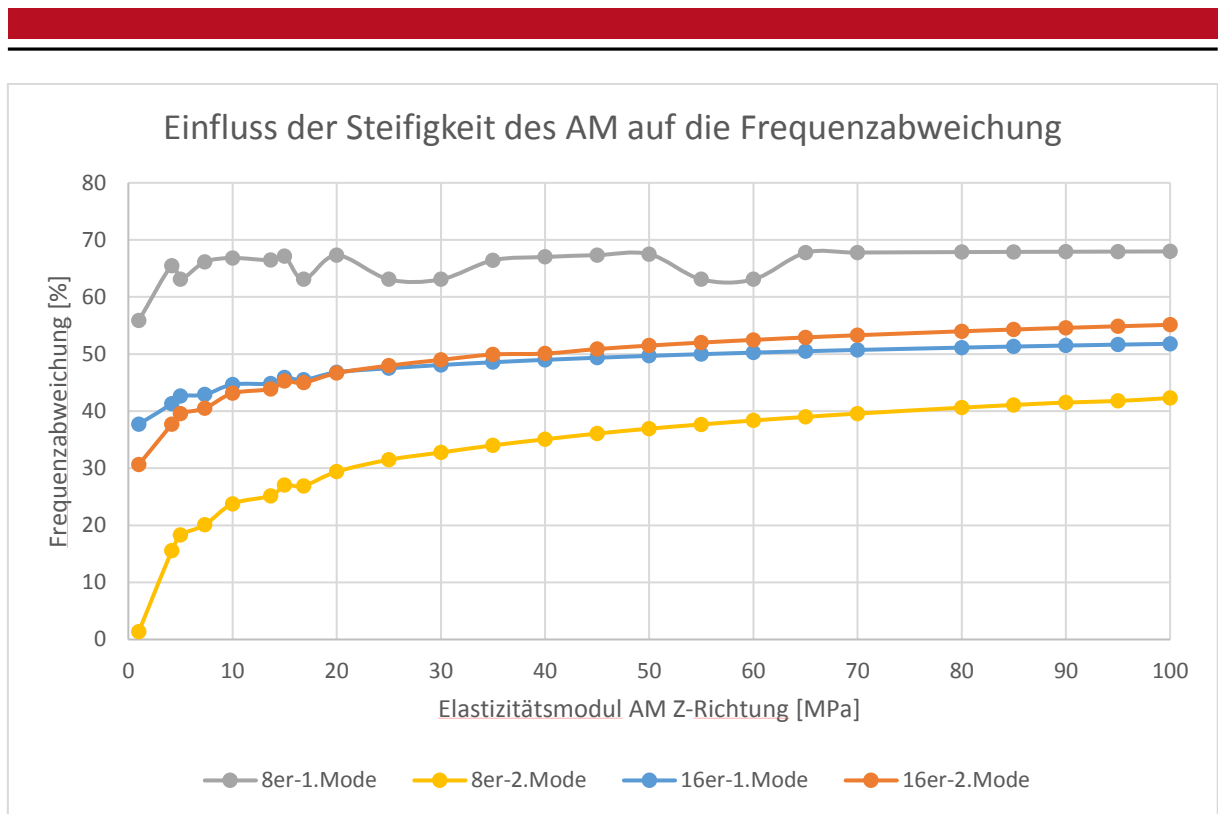


Abbildung 43: Einfluss des Elastizitätsmoduls des AM in Out-of-plane-Richtung über verschiedene modalen Parameter

Der Elastizitätsmodul des Aktivmaterials (AM) in Out-of-Plane-Richtung hat einen großen Einfluss auf die Frequenzabweichung. Die Tendenz zeigt, dass die Frequenzabweichung bei sehr niedrigen Steifigkeiten exponentiell sinkt. Um eine Steifigkeit nahe null zu modellieren, wird das Aktivmaterial durch Punktmasse ersetzt. Dieses neue Modell wird als „ohne Aktivmaterial“ bezeichnet. Die neuen ermittelten modalen Parameter werden in der Tabelle 7 mit den ersten Ergebnissen verglichen.

Tabelle 7: Abgleich modalen Parameter mit und ohne Zellwicket

		FEM- Frequenz (Hz)		Versuch-Frequenz (Hz)	Differenz (Hz)		Differenz (%)		MAC	
		Mit AM	Ohne AM		Mit AM	Ohne AM	Mit AM	Ohne AM	Mit AM	Ohne AM
8er Zellmodul	1	1140,16	947,28	955,79	184,37	-8,51	19,29	-0,89	0,840	0,835
	2	994,03	947,60	606,04	387,99	341,56	64,02	56,36	0,629	0,652
16er Zellmodul	2	528,65	449,41	380,02	148,63	69,39	39,11	18,26	0,793	0,782
	3	805,33	659,03	574,62	230,71	84,41	40,15	14,69	0,382	0,335

Alle Frequenzabweichung sinken beim Modell ohne Aktivmaterial. Beim 16er Zellmodul werden die Frequenzen 20% besser. Die MAC-Werte erfahren keine signifikanten Veränderungen. Die Ergebnisse des 8er-Zellmodul sind deutlich besser bei der erste Mode. Sowohl die Frequenzabweichung als auch die MA-Werte weisen auf eine gute Modellierung hin. Allerdings zeigt die zweite Mode noch eine sehr hohe Frequenzabweichung von 56,36%. Diese Frequenz gehört zum ersten Torsionsmode.

Um die Modelle weiter zu verbessern, wird der Einfluss der Klebefolie in einer neuen Materialkonfiguration untersucht. Dazu wird eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt, wobei die Korrelation der Kleberfolie mit dem Ausgangsparameter in Abbildung 44 gezeigt wird.

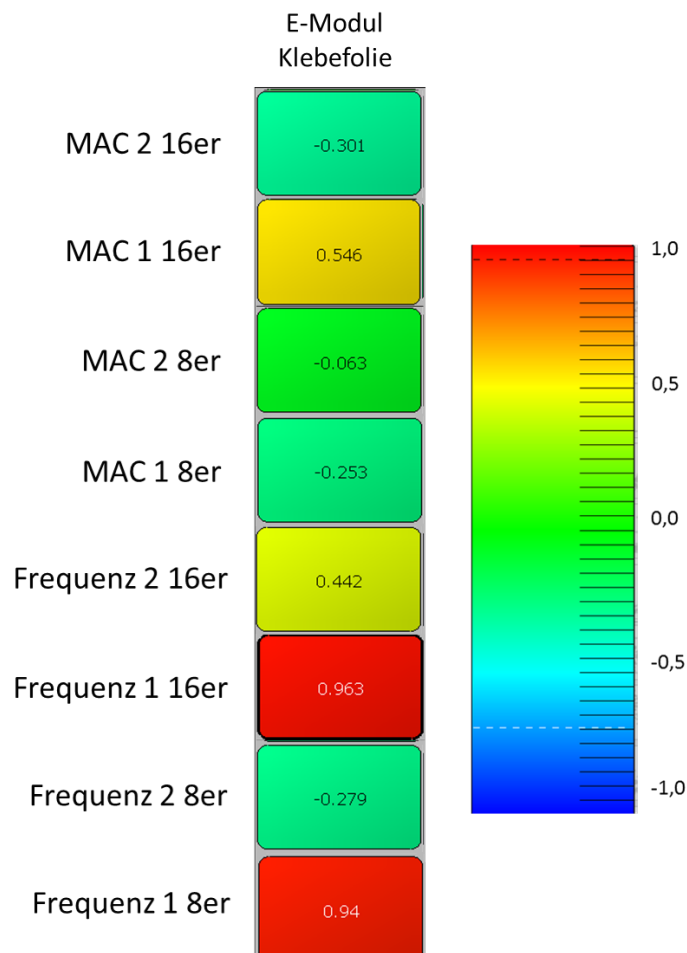


Abbildung 44: : Spearman Korrelationsmatrix zwischen dem Elastizitätsmodul der Klebefolie und den modalen Parameter (8er und 16er Modul)

Die Ergebnisse weisen eine starke Korrelation der ersten Frequenzen des 8er- und 16er-Zellmoduls. Um dem Einfluss weiter zu analysieren werden Anthill Plots dieser Parameter und die jeweiligen MAC-Werte in Abbildung 45 dargestellt.

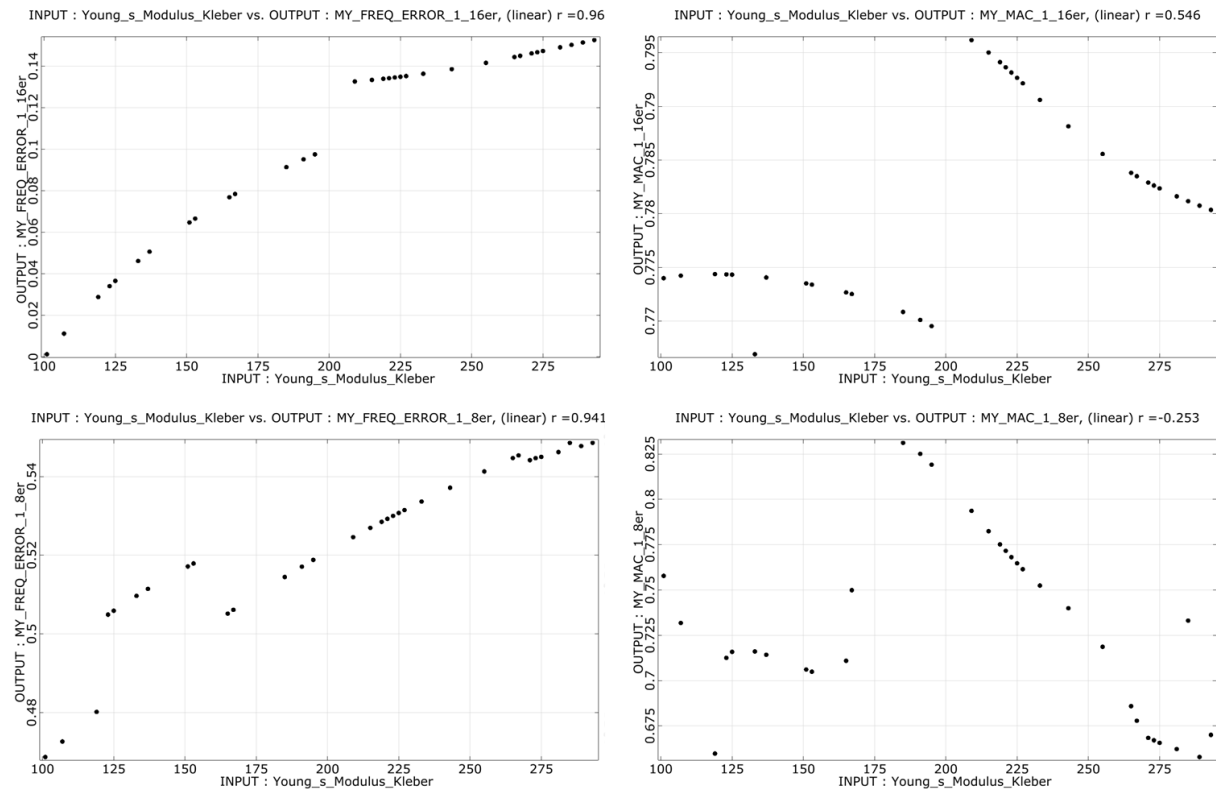


Abbildung 45: Einfluss des Elastizitätsmoduls der Kleberfolie auf verschiedene modalen

Es wird beobachtet, dass bei einem Elastizitätsmodule von 100 MPa die Eigensfrequenzen sowohl vom 16er Zellmodul als auch vom 8er sehr gut modelliert werden. Bei der Torsionsmode sind die Frequenzabweichungen zu hoch. Allerdings zeigt Tendenz, dass durch die Senkung des Elastizitätsmoduls die Frequenzabweichung verbessert wird. Folglich wird versucht die Klebefolie mit eine sehr niedrige Steifigkeit zu modellieren. Bei einem Elastizitätsmodul von 10 MPa wird eine Frequenzabweichung beim Torsionsmode von 0,9 % erreicht aber die andere Frequenzabweichung steigt auf 20 %. Die ermittelten Ausgangsparameter bei einem Elastizitätsmodule der Kleberfolie von 100 MPa werden in Tabelle 8 zu den Ausgangsmodelle (300 MPa) verglichen.

Tabelle 8: Abgleich modalen Parameter mit hohe und niedrige Steifigkeit der Kleberfolie

	Mode	FEM- Frequenz (Hz)		Versuch- Frequenz (Hz)	Differenz (Hz)		Differenz (%)		MAC	
		300 MPa	100 MPa		300 MPa	100 MPa	300 MPa	100 MPa	300 MPa	100 MPa
8er Zellmodul	1	947,28	982.17	955,79	-8,51	26.38	-0.89	2,76	0,835	0,84
	2	947,60	898.09	606,04	341,56	292.05	56,36	48,19	0,652	0,78
16er Zellmodul	1	449,41	388.76	380,02	69,39	8.74	18,26	2,30	0,782	0,77
	2	659,03	625.36	574,62	84,41	50.74	14,69	8,83	0,335	0,31

In Abbildung 45 wird auch beobachtet, dass bei manchen Elastizitätsmodulen die Frequenzabweichungen und die MAC-Werte springen. Die Ursache dieses Verhaltens liegt am der Abgleich des Schwingmoden und wird in Abschnitt 4.1 erläutert. In der Simulation gibt es Schwingformen die ähnlich sind. In dieser Fall wird auch die Frequenzabweichung bewertet. Folglich kann das Abgleichverfahren neue Moden auswählen.

Folgende Abbildung vergleicht die Frequenzabweichung der drei Modelle: Mit Zellwickel (AM), ohne Zellwickel (300 MPa) und ohne Zellwickel (100 MPa).

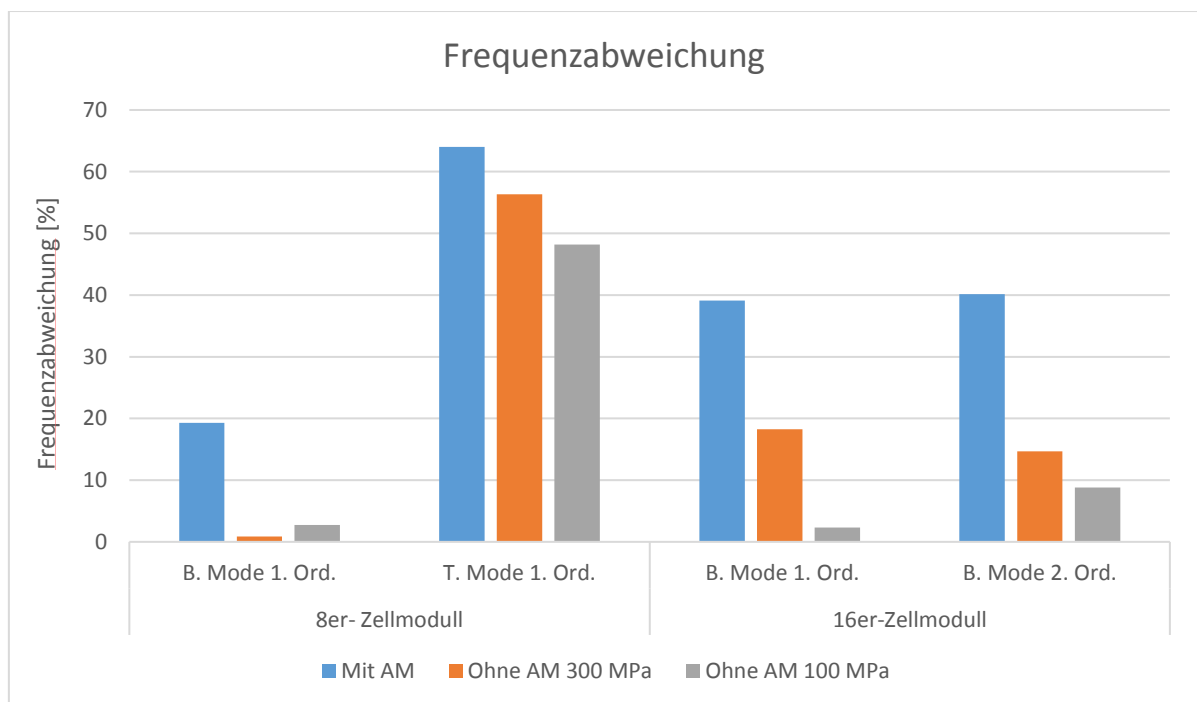


Abbildung 46: Abgleich der Frequenzabweichungen der drei Modelle

Schließlich wird eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt, wobei die Materialeigenschaften von allen Komponenten betrachtet werden. Wie beim Modulrahmen sind alle Parameter keine reale Unbekannten aber durch die Sensibilitätsanalyse werden auch Fehler bei der Geometrieabbildung ermittelt. Die jeweilige Korrelationsmatrix wird in Abbildung 47 dargestellt.

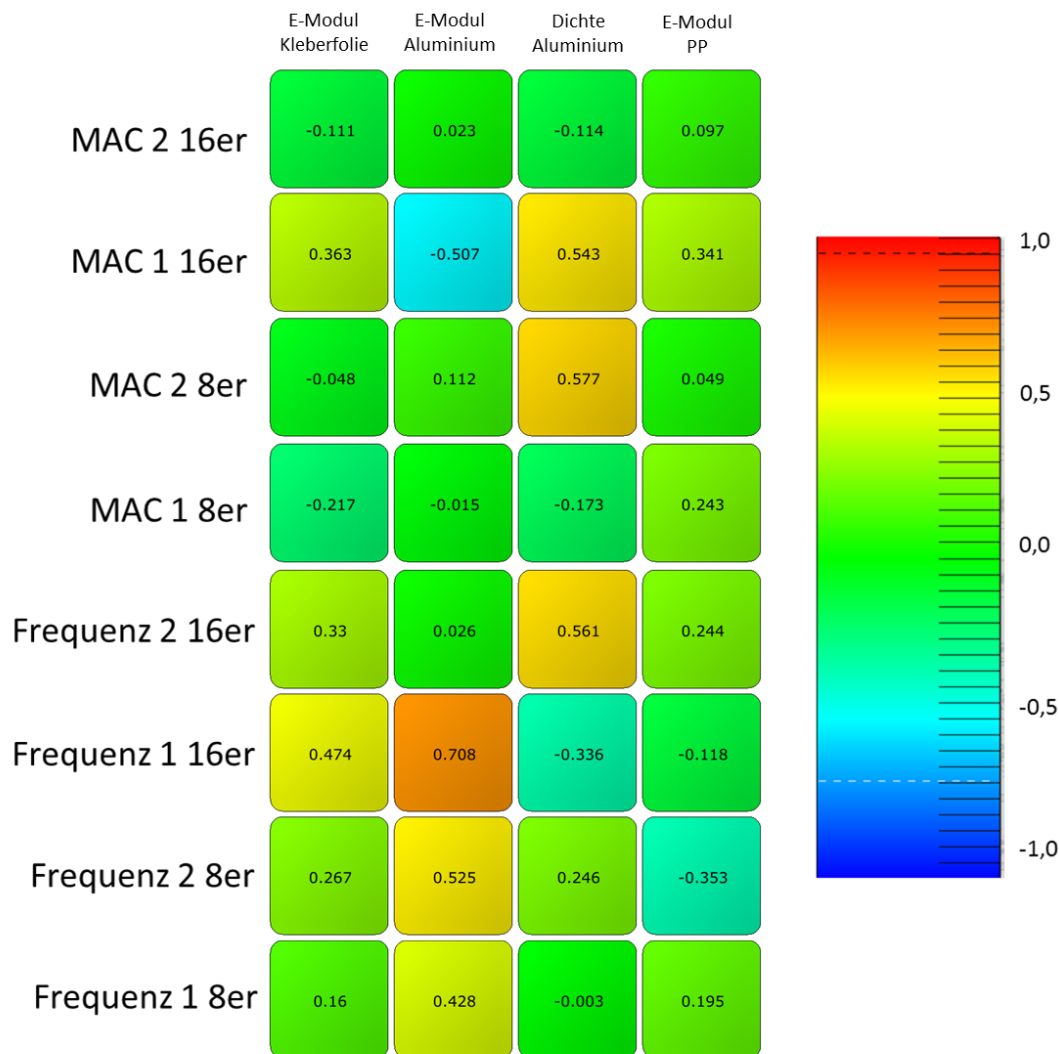


Abbildung 47: Spearman Korrelationsmatrix zwischen Designvariablen und die modalen Parameter (8er und 16er Modul)

Der Elastizitätsmodul des PP, wie beim Modulrahmen, korreliert sehr schwach zu den modalen Parametern. Ebenso stehen die Biegemode des 8er-Zellmoduls (MAC 1 8er) und Biegemode

zweite Ordnung des 16er-Zellmoduls (MAC 2 16er) in Wechselbeziehung zur den Designvariablen. Obwohl die anderen MAC-Werte eine beträchtliche Korrelation aufweisen, sind nicht von der untersuchte Materialeigenschaften stark beeinflusst. Abbildung 48 zeigt das Verhältnis zwischen die Dichte des Aluminiums und zwei zu den Designvariablen korrelierten MAC-Werte.

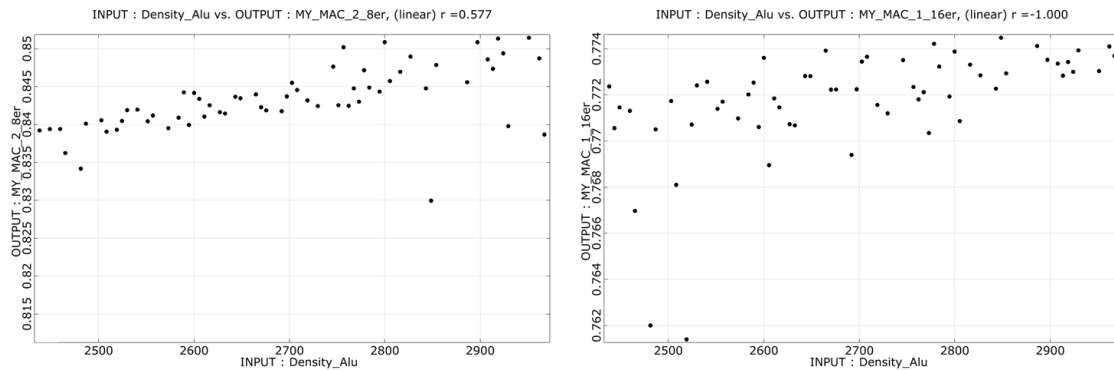


Abbildung 48: Einfluss des Elastizitätsmoduls der Kleberfolie auf verschiedene modalen

Die MAC-Werte schwanken zwischen 0,830 und 0,850 bei der Torsionsmode des 8er-Zellmoduls (MAC 2 8er) und zwischen 0,760 und 0,774 bei der Biegemode erste Ordnung (MAC 1 16er) des 16er-Zellmoduls. Die Frequenzabweichung weist allerdings einen großen Einfluss und Korrelation mit den Designvariablen auf. In Abbildung 49 werden das Verhältnis zwischen Frequenzabweichungen und den korrelierten Designvariablen dargestellt.

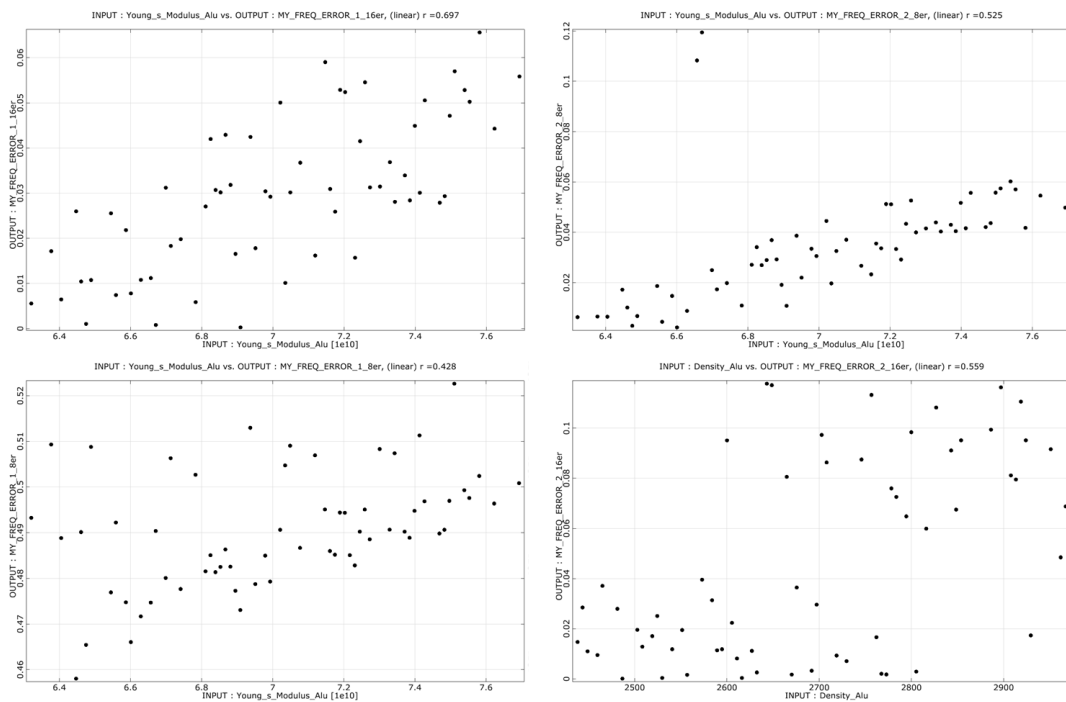


Abbildung 49: Verhältnis zwischen den Frequenzabweichungen und den am korrelierten Designvariablen

Die Schwankungen sind deutlich höher bei den Frequenzabweichungen als bei den MAC-Wert (0,08-0,12). Folglich werden im Optimierungsverfahren der Zellmodule das Aluminium (Elastizitätsmodul und Dichte) und das Elastizitätsmodul der Klebefolie berücksichtigt. Bei manchen Designpunkten sind die Frequenzabweichungen der Biegemoden im der Nähe von 0%. Allerdings bleibt die Frequenzabweichung der Torsionsmode noch sehr hoch (46%). Die Torsionssteifigkeit hängt grundsätzlich vom Schermodul ab, der bei isentropen Material vom Elastizitätsmodul abhängt. Diese Ergebnisse weisen auf ein nicht isotropes Verhalten der Klebefolie hin.

### 5.3 Optimierung

Die Optimierungsphase ergibt die Parameterwerte, die die Abweichung zwischen numerische und experimentelle Modalanalyse minimieren. Dazu wird eine Zielfunktion und eine Optimierungstechnik definiert. Das in Abbildung 47 dargestellte Flussdiagramm zeigt den iterativen Prozess der Kalibrierung des numerischen Modells.

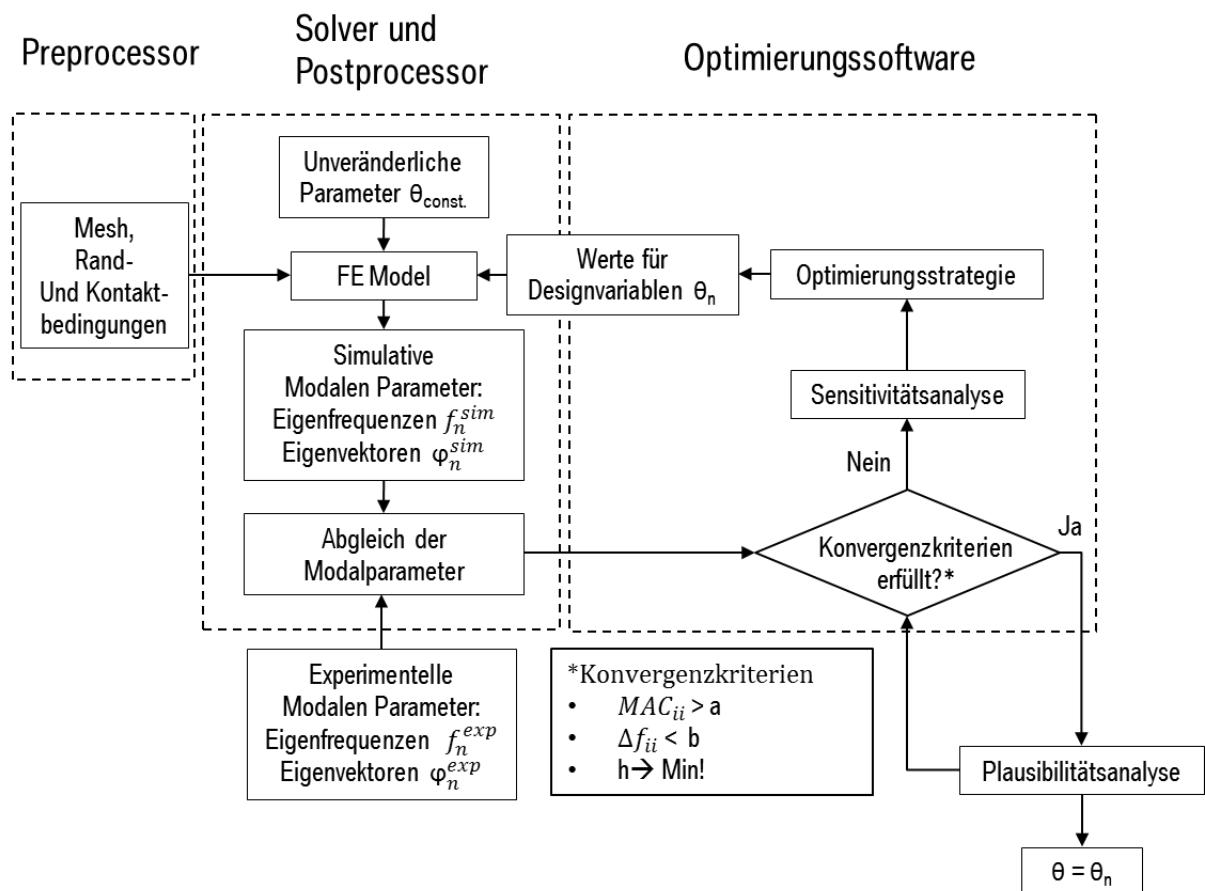


Abbildung 50: Flussdiagramm der entwickelten Kalibrierungsmethode



Mesh, Rand- und Kontaktbedingungen des Modells, die in einem Preprocessor definiert werden, werden an einen Solver exportiert. Wobei Ausgangsparameter zugewiesen werden. Das Eigenwert- und Eigenvektor-Problem wird gelöst und mit den experimentellen Ergebnissen durch den MAC verglichen. Schließlich schätzt die Optimierungssoftware auf Basis einer Zielfunktion und der Anwendung einer Optimierungstechnik einen neuen Satz von Parametern, die sich auf die Minimierung der Zielfunktion beschäftigen.

Die Zielfunktion ( $f$ ) betrachtet zwei Anteile. Eine berücksichtigt die Frequenzabweichungen und die andere die MAC-Werte:

$$f = \sum_{i=1}^m |\Delta f_{ii}| + \sum_{i=1}^m |MAC_{ii} - 1| \quad (51)$$

Die Optimierung der Modulrahmen beinhaltet die Verwendung von 2 Designvariablen und 8 modalen Parametern. Aufgrund der niedrigen Anzahl von Designvariablen wird eine Gradientenbasierte Methode verwendet. Der Optimierungsprozess konvergiert nach 198 verschiedenen Kombinationen. Dessen Ablauf wird in Abbildung 48 dargestellt.

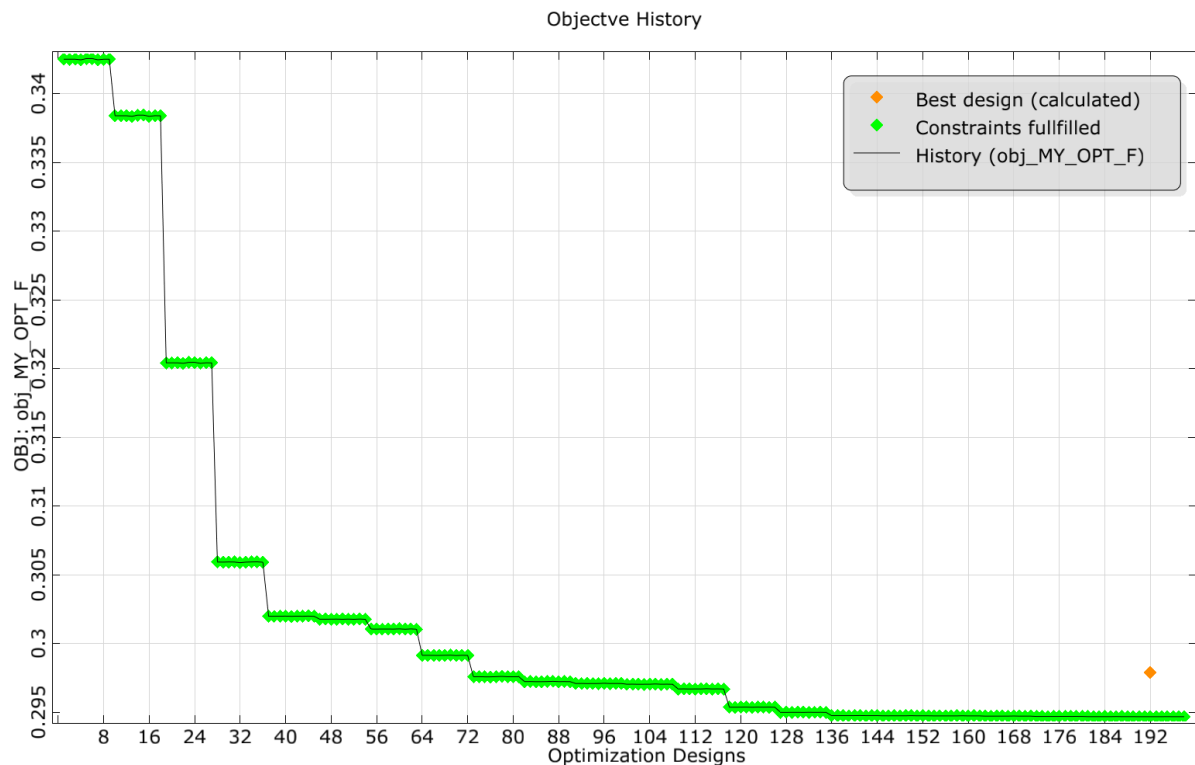


Abbildung 51: Ablauf der Optimierungsprozess

Der Optimierungsprozess ergibt einen minimalen h-Wert von 0,298. Die Abweichung zwischen den initialen und finalen modalen Parametern werden in Abbildung 49 gezeigt. Die MAC-Werte bleiben unverändert und werden nicht gezeigt.

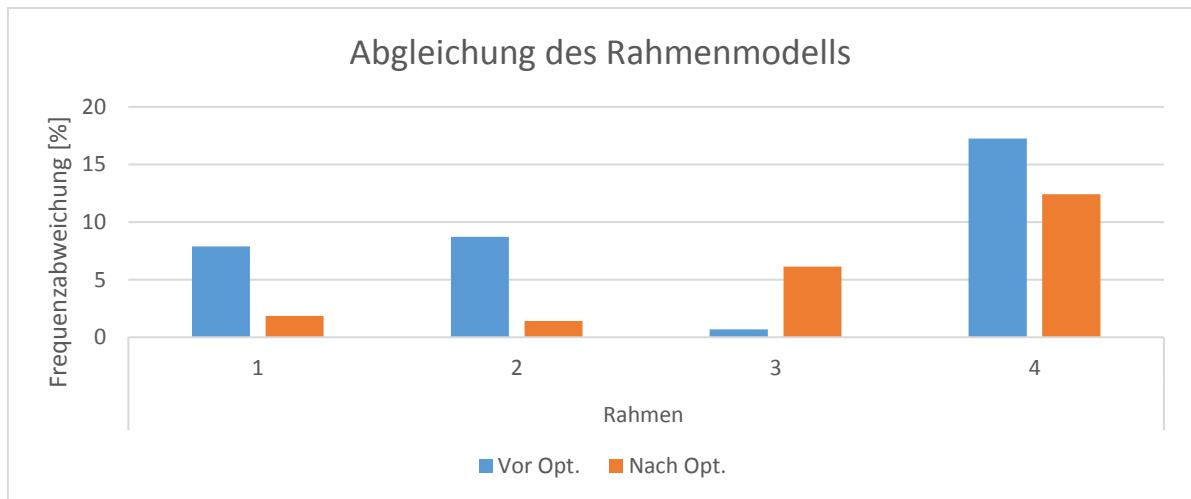


Abbildung 52: Abweichung zwischen initialen und finalen modalen Parameter des Modulrahmens

Die Optimierung der Zellmodule beinhaltet die Verwendung von 4 Designvariablen und 8 modalen Parameter. Da gleichzeitig zwei Modelle (zwei Zielfunktionen) optimiert werden, wird ein evolutionärer Algorithmus verwendet. Folgende Abbildung vergleicht die Frequenzabweichung des optimierten Modells mit drei verschiedenen Modellen: Mit Zellwickel (AM), ohne Zellwickel (300 MPa) und ohne Zellwickel (100 MPa).

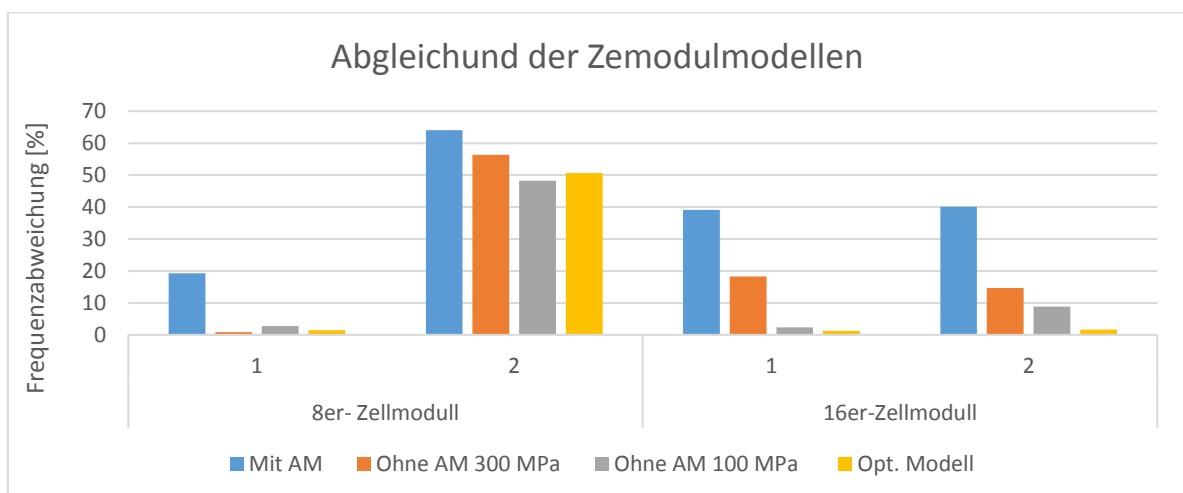


Abbildung 53: Abweichung zwischen initialen und finalen modalen Parametern des 8er- und 16er- Modul

---

Der letzte Optimierungsschritt weist eine Verbesserung der Biegemoden und ergibt Frequenzabweichungen unter 2%. Die Torsionsmode wird nicht gut abgebildet und seine Frequenzabweichung liegt über 50%.

---

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

---

Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Entwicklung einer basierten, transferierbaren, validierten Berechnungsmethode zur numerischen Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Zellmodulen. Zur Erreichung dieses Ziels wurden in Abschnitt 1.2 folgende wesentliche Unterziele definiert:

- Aufbau eines linearen FE-Modells
- Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen
- Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells

Die Erfüllung dieser Subziele wird im Folgenden einzeln geprüft und diskutiert, wodurch auch die gesamthafte Zielerreichung verifiziert wird.

### **Aufbau eines linearen FE-Modells**

Nach der Analyse des aktuellen Simulationsmodells der Zellen und des Zellmoduls wurde ein erweitertes Modell unter Hinzunahme bislang vernachlässigter oder abstrahierter Komponenten nach den Anforderungen der Gesamtfahrzeugsimulation entwickelt. Hierzu wird einerseits der Zellwickel mittels eines orthotropen Materialmodells abgebildet. Ebenso werden Einflüsse des Herstellungsprozesses modelliert. Das aufgebaute, detailliertere FE-Modell des Zellmoduls erlaubt die Ermittlung der modalen Parameter und weist eine genauere Abbildung der Schwingformen als bisherige Modellierungsansätze auf.

Durchgeführte Analysen des Verspannungsprozesses zeigen, dass die eingebrachte Vorspannung einen vernachlässigbaren Einfluss auf die globalen Moden des Zellmoduls hat. Infolge dieser Erkenntnis, konnten etwa 50% der gesamten Berechnungszeit gespart werden.

### **Planung, Durchführung und Auswertung der Versuche**

Es wurden drei Prüflinge aus gleichartigen Komponenten aufgebaut, um deren Schwingverhalten und Skalierbarkeit zu untersuchen. Mittels des Modulrahmens wurde ein System gewählt, um zunächst das Kalibrierungsverfahren zu bestätigen, indem eine grundsätzlich bekannte Komponente als Untersuchungsgegenstand verwendet wurde. Die

---

experimentell ermittelten modalen Parameter gestattete eine eindeutige Identifikation von Biege- und Torsionsmoden, die eine fundierte Auswertung von 0 bis 3000Hz ermöglichten. Das Schwingverhalten beider Zellmodule unterhalb 2000Hz ermöglichte ebenfalls eine gute Identifikation von zwei charakteristischen Schwingformen. Oberhalb dieses Spektrums konnten aufgrund hoher Dämpfungen der Prüflinge keine eindeutigen Eigenfrequenzen ermittelt werden. Ebenso traten viele Superpositionen von lokalen und globalen Moden auf, sodass eine eindeutige Identifikation weiter erschwert wurde und eine entsprechende Vernachlässigung nicht vermeidbar war.

### **Validierung und Kalibrierung des Simulationsmodells**

Zur Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells wurde eine Abgleichmethode vorgestellt. Damit ist die Bewertung der Identität simulativ und experimentell ermittelten Resonanzen möglich. Die geringe Anzahl der experimentellen, eindeutigen mittels MAC-Methode identifizierbaren Schwingformen forderte allerdings zusätzlich eine visuelle Bestätigung. Nur durch dieses aufwändige Verfahren konnten die beiden zur Optimierung herangezogenen Schwingformen der Module einander zugeordnet werden.

Die Ermittlung der korrelierenden Schwingformen ermöglichte die Berechnung der Frequenzabweichung zwischen den gleichen Moden. Einerseits ergab der initiale Abgleich des Modulrahmens Abweichungen von etwa 10%, die durch das vorgestellte Kalibrierungsverfahren auf unter 5% gesenkt werden konnten. Andererseits deuten die Ergebnisse beim Zellmodul darauf hin, dass die Steifigkeit der Modelle in Vergleich zu den realen Systemen anfangs zu hoch abgebildet wurde. Die Sensibilitätsanalyse ergab, dass die verwendete Steifigkeit des Zellwickels deutlich zu groß war und deshalb vernachlässigt werden muss.

Die Modelle, die die Steifigkeit des Zellwickels nicht betrachten, weisen eine deutliche Verbesserung der Abbildung der Biegemoden auf. Darüber hinaus wurde die Steifigkeit der Klebefolie als weiteres Optimierungspotential erkannt und entsprechend untersucht. Hierdurch konnte die Abbildung der Biegemoden deutlich verbessert werden, sodass Schwingformen identisch blieben und die Frequenzabweichungen auf weniger als 3% gesenkt werden konnten. Das Torsionsverhalten des Simulationsmodells konnte mit der gewählten Methode der Foliendarstellung wenig verbessert werden, daher wird eine alternative Abbildung des Materialverhaltens mittels orthotropen Materialeigenschaften vorgeschlagen.

---

## Ausblick

Um die entwickelte Berechnungsmethode bzw. die numerische Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Zellmodulen zu verbessern, werden folgende weitere Untersuchungen empfohlen:

- FE-Modell
  - Geometrie der Kunststoffbauteile die nicht in Lastpfad sind vernachlässigen
  - Kleberfolie mit orthotropen Materialeigenschaften modellieren
- Versuche
  - Anzahl der globalen Schwingformen erhöhen . Dazu dürfen keine Messungen direkt auf den Zellen stattfinden. Messpunkte könnten auf das Bodenblech gesetzt werden.
  - Um die Steifigkeit der Zellen zu charakterisieren, sollen einzelne Zellversuche durchgeführt werden.
- Kalibrierung-Verfahren
  - Abgleichverfahren verbessern, um visuelle Auswertung zu vermeiden
  - Optimierungsfunktion weiterentwickelt

---

## Literaturverzeichnis

---

- Ali, Mohammed Yusuf; Lai, Wei-Jen; Pan, Jwo (2013): Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests. In: *Journal of Power Sources* 242, S. 325–340. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.022.
- ANSYS, Inc (2013): ANSYS APDL advaced user guide.
- Archer, Robert R.; Lardner, Thomas J.; Crandall, Stephen H. (1999): An introduction to the mechanics of solids. 2nd ed. with SI units. Boston: McGraw-Hill Custom Pub (McGraw-Hill's Primis custom series).
- Askeland, Donald R.; Fulay, Pradeep P.; Wright, Wendelin J. (2011): The science and engineering of materials. 6th edition. Stamford, CT: Cengage Learning.
- Besenhard, Jürgen O. (Hg.) (1999): Handbook of battery materials. ebrary, Inc. Weinheim, New York: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10275148>.
- Birke, Peter; Schiemann, Michael (2013): Akkumulatoren. Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft elektrochemischer Energiespeicher. München: Herbert Utz Verlag.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2007): Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunktfür ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm. Online verfügbar unter [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/gesamtbericht\\_iekp.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/gesamtbericht_iekp.pdf).
- Cai, Wei; Wang, Hsin; Maleki, Hossein; Howard, Jason; Lara-Curzio, Edgar (2011): Experimental simulation of internal short circuit in Li-ion and Li-ion-polymer cells. In: *Journal of Power Sources* 196 (18), S. 7779–7783. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.04.024.
- Cousseau, Jean-François; Siret, Clemence; Biensan, Philippe; Broussely, Michel (2006): Recent developments in Li-ion prismatic cells. In: *Journal of Power Sources* 162 (2), S. 790–796.
- D. Giljohann: Abkomplung von Körperschall. Online verfügbar unter [http://www.computational-acoustics.de/html/akustische\\_abkopplung.html](http://www.computational-acoustics.de/html/akustische_abkopplung.html).
- Enrico Primo Tomasini (2006): Mechanical Systems and Signal Processing. Espacial Issue: Laser Doppler Vibrometry. Volumen 20, Issue 6.
- Ewins, D. J. (2000): Modal testing. Theory, practice and application. 2. ed. Baldock: Research Studies Pr (Mechanical engineering research studies : Engineering dynamics series, 10).
- Freyman, Raymond (2011): Strukturdynamik. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-19698-0>.
- Friswell, Michael; Mottershead, John E. (1995): Finite element model updating in structural dynamics: Springer Science & Business Media.
- Greve, Lars; Fehrenbach, Clemens (2012): Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells. In: *Journal of Power Sources* 214, S. 377–385.
- Hanselka, H.; Jöckel, M. (2010): Elektromobilität: Elemente, Herausforderungen, Potenziale. Berlin: Springer.
- Jossen, Andreas; Weydanz, Wolfgang (2006): Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. 36 Tabellen. Neusäß: Ubooks-Verl.
- Kampker, Achim (2014): Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-42022-1>.
- Klein, Bernd (2015): FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 10., verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Korthauer, Reiner (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2>.

---

Kreißig, Reiner; Benedix, Ulrich (2002): Höhere technische Mechanik. Lehr- und Übungsbuch. Wien u.a.: Springer (Springer Technik).

Laderaranch (2008): Basic schematic of a laser Doppler vibrometer. Online verfügbar unter [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/LDV\\_Schematic.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/LDV_Schematic.png).

Lai, Wei-Jen; Ali, Mohammed Yusuf; Pan, Jwo (2013a): Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions. In: *Journal of Power Sources* 245, S. 609–623. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.134.

Lai, Wei-Jen; Ali, Mohammed Yusuf; Pan, Jwo (2013b): Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery modules under various loading conditions. In: *Journal of Power Sources* 248, S. 789–808.

Liu, Ping; Sherman, Elena; Jacobsen, Alan (2009): Design and fabrication of multifunctional structural batteries. In: *Journal of Power Sources* 189 (1), S. 646–650. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.09.082.

Markert, Richard (2013): Strukturdynamik. Aachen: Shaker (Mechanik).

Nguyen, j.; Taylor, C. (Hg.) (2004): Safety performance for phosphate based large format lithium-ion battery. Telecommunications Energy Conference, 2004. INTELEC 2004. 26th Annual International: IEEE.

Otsuki, Masashi; Ogino, Takao; Amine, Khalil: Investigation of Flame-Retardant Additives for Safety Usage of Lithium-Ion Batteries. In: 208th ECS Meeting. Los Angeles, California, October 16–October 21, 2005, S. 13–19.

Reddy, Thomas B.; Linden, David (Hg.) (2011): Linden's handbook of batteries. 4. ed. New York, NY: McGraw-Hill.

Reuss, A. (1929): Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. In: *Z. angew. Math. Mech.* 9 (1), S. 49–58. DOI: 10.1002/zamm.19290090104.

Ritchie, Andrew; Howard, Wilmont (2006): Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 162 (2), S. 809–812.

S.G. Lekhnitskii (1963): Theory of elasticity of an anisotropic elastic body: Holden-Day.

Sahraei, Elham; Hill, Rich; Wierzbicki, Tomasz (2012): Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity. In: *Journal of Power Sources* 201, S. 307–321. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.094.

Schittkowski, Klaus (1986): NLPQL: A FORTRAN subroutine solving constrained nonlinear programming problems. In: *Annals of operations research* 5 (2), S. 485–500.

Schuler, Bastian (2011): Elektromobilität und Fahrzeuge. Ökonomische Bewertung des Marktpotenzials im Jahr 2020. Hamburg: Diplomica-Verl. (Reihe Nachhaltigkeit, 41).

Schwedes, Oliver (2011): Verkehrspolitik. Eine interdisziplinäre Einführung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-92843-2>.

Sheidaei, Azadeh; Xiao, Xinran; Huang, Xiaosong; Hitt, Jonathon (2011): Mechanical behavior of a battery separator in electrolyte solutions. In: *Journal of Power Sources* 196 (20), S. 8728–8734. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.026.

Shim, K. H.; Lee, S. K.; Kang, B. S.; Hwang, S. M. (2004): Investigation on blanking of thin sheet metal using the ductile fracture criterion and its experimental verification. In: *Journal of Materials Processing Technology* 155–156, S. 1935–1942. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.284.

Thaler, Alexander; Watzenig, Daniel (2014): Automotive battery technology (SpringerBriefs in applied sciences and technology). Online verfügbar unter <http://lib.mylibrary.com?id=601356>.

Venugopal, Ganesh; Moore, John; Howard, Jason; Pendalwar, Shekhar (1999): Characterization of microporous separators for lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 77 (1), S. 34–41. DOI: 10.1016/S0378-7753(98)00168-2.

Voigt, W. (1889): Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper. In: *Ann. Phys.* 274 (12), S. 573–587. DOI: 10.1002/andp.18892741206.



---

Wakihara, Masataka; Yamamoto, Osamu (2008): Lithium Ion Batteries. Hoboken: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=481880>.

Wierzbicki, Tomasz; Sahraei, Elham (2013): Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells. In: *Journal of Power Sources* 241, S. 467–476. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.04.135.

Yoshio, Masaki (Hg.) (2009): Lithium-Ion Batteries. Science and Technologies. New York, NY: Springer-Verlag New York. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-34445-4>.

Zabel, Volkmar; Brehm, Maik (2009): Model updating methods—a comparative study.

Zinner (2013): Physical Modeling Approach for Subcomponents of IPM Machines. TU München, München. Lehrstuhl für Experimentalphysik II E21.